学科長　　時政　勝行　　㊞

指導教員　　渋江　唯司　　㊞

卒　業　論　文

平成 15 年度

ミニ自動車におけるエンジンのシリンダブロック及びシリンダヘッドの熱伝達解析

平成 16 年 2 月

近畿大学

生物理工学部　基礎機械工学科

00-1-39-077　中野　慎司

ミニ自動車におけるエンジンのシリンダブロック及びシリンダヘッドの熱伝達解析

目次

1 章　緒言　・・・3

1-1　緒言　・・・3

1-2　目的　・・・3

1-3　研究の手順　・・・3

2 章　ミニ自動車　・・・4

2-1　ミニ自動車の意義　・・・4

2-2　ミニ自動車の構造、性能　・・・4

2-2-1　ミニ自動車のエンジン　・・・5

2-2-2　エンジンの材質　・・・5

2-3　ミニ自動車の組み立て　・・・6

3 章　温度測定実験　・・・7

3-1　実験の概要　・・・7

3-2　使用機器　・・・7

3-1-1　非接触温度計　・・・7

3-1-2　接触温度計　・・・8

3-3　温度校正　・・・9

3-3-1　サーモトレーサ TH5104 の放射率の決定　・・・9

3-3-2　サーモトレーサ TH5104 と接触温度計の誤差の測定　・・・13

3-4　測定実験　・・・14

3-5　実験結果　・・・15

4 章　有限要素解析　・・・18

4-1　解析の概要　・・・18

4-2　解析装置　・・・18

4-3　解析モデル　・・・18

4-3-1　非軸対称モデル　・・・18

4-3-2　軸対称モデル　・・・20

4-3-3　解析モデル　・・・20

4-4　数値解析　・・・26

4-4-1　解析条件　・・・26

4-4-2　解析方法　・・・27

4-4-2　解析結果　・・・29

5 章　考察　・・・39

6 章　結言　・・・39

参考文献　・・・40

付録　・・・41

1 章　緒言

1-1　緒言

自動車は、他の機械と比較して色々な意味でかなり厳しい使用条件下に置かれていると同時に、多くの人が気軽に利用でき、しかも、かなりの速度で自由な方向へ移動しうる便利な機械である。

自動車の設計にあたっては工業全般にわたる知識が必要である。また、自動車生産は一般に大量生産方式がとられるので、一度設計が決定されれば、これに基づき膨大な生産設備が作られ、大量生産されるのであるから設計にあたっては常にこの点を考え慎重な態度で臨み、一点一線もおろそかに出来ない。自動車の中でエンジンというものは過酷な条件下で使用され続けている。自動車が動いている間中ずっとエンジンは動き続けたままである。そのような使用状態ではエンジンには大きな負担がかかってくる。また、様々な問題点も有ると考える。

・資源の枯渇化
・自然環境の破壊

この 2 つの問題は現在世界中で叫ばれていることである。これらの要求を満たせるエンジンを作る事が課題になっている。また、エンジンには、近年、低公害化・低燃費化・軽量化の要求が益々厳しくなっており、エンジン各部分にかかる機械的・熱的負担も増大している。また、開発期間も短縮され、性能・機能・耐久性を兼ね備えたエンジンをタイムリーに開発することが、課題となっている。

1-2　目的

エンジン開発には熱応力を考慮する必要がある。しかし、内部の温度計測は難しい。また、外部の表面温度を測定することは比較的容易である。エンジンのシリンダブロックの外表面の温度から内部の爆発力を受ける部分の温度が推測できれば、エンジン開発における時間短縮にもつながる。したがって、内部の温度を推定できれば利点がある。設計技術としては有用である。

そこで、本研究では、ミニ自動車のエンジンの外表面の温度を実際に測定し、FEM 解析を用いてエンジンのシリンダブロックの外表面の温度から内部の温度を推定しエンジンのシリンダブロック内部の温度分布を推定する技術を得る事を目的とする。

1-3　研究の手順

①エンジンのシリンダブロック及びシリンダヘッドの寸法をノギスを利用して測る。
②その寸法を使い解析モデルを作る。
③ミニ自動車のエンジンが動かせるようになるまで組み立てる。
④エンジンの温度測定実験を行う。

⑤熱伝達解析を行うために温度パラメーターを考える。
⑥考えた温度パラメーターを使い実験で得られた温度履歴のグラフに合うように熱伝達解析を行う。
⑦温度の熱伝達解析を用いて温度変化を再現する方法を求める。

2 章　ミニ自動車

2-1　ミニ自動車の意義

研究対象となるミニ自動車は光岡自動車製組み立て式キットカーK－1。
K－1 はキットカーシリーズのエンジンからすべて組み立てていくタイプである。このミニ自動車は軽自動車税が 2500 円、自賠責保険が 9500 円（2 年）と維持費が安く、車庫証明、重量税、車検、所得税がかからない為、軽自動車と比べても経済的である。第 1 種原動機付自転車の中の、原動機付 3、4 輪自転車の技術基準に適合している。キットカー車両法では原動機付自転車となり法定最高速度は時速 50km が最高速度となる。しかし、道路交通法上からは自動車扱いとなるので、運転免許としては原付免許ではなくて普通免許が必要になる。

普段の足としての知名度はまだ低いが、電気自動車、高齢者向けシニアカー、ゴルフ場のカートなど公道以外の場所で活躍している。原動機は原動機付自転車（スクーター）に使用される強制空冷 50cc エンジン､ベルト駆動･自動遠心クラッチの無段変速機を使用し、一人乗りの後機関後駆動車（リヤエンジン・リヤドライブ車＝RR 車）である。小型ボディで 50cc なので燃費はとてもよい。狭い路地でも走れ、パーキングもバイク並なので気軽に乗ることができるなどの利点がある。

2-2　ミニ自動車の構造、性能

ミニ自動車の主要諸元を下の表 1 にまとめる。また完成の写真を写真 1 に示す。

表 1　ミニ自動車の主要諸元

全長 (mm)	1755
全幅 (mm)	1080
全高 (mm)	1470
軸間距離 (mm)	1110
乾燥重量 (kg)	160
エンジン種類	単気筒横置強制空冷2サイクル (49cc)
点火方式	バッテリーCDI方式
最高出力	6.1ps/6500rpm
最大トルク	0.70kgm/6000rpm
始動方式	セルモーター式
乗員定数	1人
タイヤサイズ	3.50-8　46J
ブレーキ形式	油圧式リーディングトレーリング (前後輪)

写真１　ミニ自動車

2-2-1　ミニ自動車のエンジン

エンジンの種類：単気筒横置強制空冷 2 サイクル（49cc）

点火方式：バッテリーCDI 方式

最高出力：6.1ps/6500rpm

最大トルク：0.70kgm/6000rpm

始動方式：セルスターター式

2-2-2　エンジンの材質

50cc の 2 サイクルエンジンは FC200 相当のパーライト地ねずみ鋳鉄が良く使われている。なぜならば、複雑な形状はシェル型で鋳抜く事が可能である。また、スクーターなどの出力低いエンジンではコストが安いという点でも使われている。

今回の実験および解析では正確な材料が分からないので、ミニ自動車が 50cc の空冷 2 サイクルエンジンであることを考えて、シリンダブロックの部分を FC200 鋳鉄、シリンダヘッドの部分をアルミニウムとし実験および解析を行った。材料特性として下の表 2 にまとめる。

表 2　エンジンの材料特性表

	FC200	アルミニウム
ヤング率 (N/m^2)	100.9×10^9	69×10^9
線膨張係数 $(\times10^{-6}/℃)$	12	23.7
密度 (Kg/m^3)	7200	2688
ポアソン比	0.3	0.33
熱伝導率 (W/(m/K))	50	237
比熱 (kJ/(kgK))	0.483	0.905
熱伝達率 (W/(m/K))	10	20
放射率	0.04	0.7

2-3 ミニ自動車の組み立て

まずバラバラだったミニ自動車の組み立てに取り掛かる。

ミニ自動車の組み立て説明書は、エンジン編、シャーシ編、ボディー編の 3 部構成になっている。この中でエンジン部については先輩方の時代に完成していた。

①エンジン部の組み立て

クランクシャフト、ミッション、スターターモーター、ピストン・シリンダー、V ベルト CVT、オイルポンプ、キャブレター、スピードメーターギヤ、シフトアーム、クーリングファン、ドライブシャフト・マフラーなどの項目があり完成していました。そして、実験に必要なシリンダブロック及び、シリンダヘッドをエンジン本体からはずしノギスを利用して寸法を測りモデル作成の準備をする。写真 2 はエンジンの部分である。

写真 2　エンジンの写真

②シャーシ部の組み立て

フロントサスペンションアーム、フロントサスペンション、ステアリングギアボックス、フロントブレーキ、フロントタイヤと最初にフロント足廻りをメインフレームに取り付ける。次にリヤ足廻りの取り付けを行う。ミッションオイルの注入、リヤブレーキ、パーキングブレーキ、リヤサスペンションアーム、リヤタイヤ、リヤサスペンション、を取り付け、完成していたエンジンを取り付けました。そして、電装品及び、ケーブルを取り付けを行い、エンジンオイル、ガソリンを注入して、エンジン始動チェックを行う。

③ボディー部の組み立て

ボディーも半分ぐらい完成していたので、ペダルベースを取り付けから、シャーシにボディの取り付けを行い、そして、フロアにケーブル・ハーネス類を引っ張り出しておき、エンジン始動に必要なケーブル・ハーネス類をつなぎ、温度測定実験をする。

3 章　温度測定実験

3-1　実験の概要

解析を行う前にエンジンのシリンダブロック及びシリンダヘッドの部分がどのような温度変化をするのかを知るために、非接触の温度計を用いて外表面の温度を測定を行う。

3-2　使用機器

3-2-1　非接触温度計

サーモトレーサーTH5104（NEC 三栄株式会社）

サーモトレーサーTH5104 は、非接触型の軽量高感度の赤外放射温度計です。測定対象からの赤外放射を光学的に走査することによって、検出器で二次元的な電気信号に変換し、増幅したアナログ温度信号をディジタル信号に変換出来る。そしてそのディジタル信号をカラー、または白黒の熱画像として表示出来る。

表 3　サーモトレーサーTH5104 の仕様

形式	レンジ1	レンジ2
温度測定範囲	－10℃～200℃	100℃～800℃
最小検知温度差	0.1℃以下 (30℃) (ノーマル) 0.3℃以下 (30℃) (ファスト1, ファスト2)	0.3℃以下 (100℃) (ノーマル) 1.0℃以下 (100℃) (ファスト1, ファスト2)
測定精度	±1.0%ＲＦＳ	±1.0%ＲＦＳ
測定波長 (半値幅)	3～3.5μm	
検出器	ＨｇＣｄＴｅ (8素子電子冷却型)	
視野角	水平21.5°×垂直21.5°	
瞬時視野角	2.2mrad	
水平解像度	170本以上	
焦点範囲	30cm～∞	
フレーム時間	1) ノーマル　1/1.6秒	
	2) ファスト1　1/22秒	
	3) ファスト2　1/22秒	
熱画像画素数	255 (H) ×223 (V)	
データ深度	12bits フルレンジ	
測定時姿勢	指定無し	
放射率補正	0.10～1.0	

写真 3　サーモトレーサーTH5104

3-2-2　接触温度計

デジタル温度計 PD－600A（SHIMADZU 島津理化学器械株式会社）

精密温度計に使用される白金 100Ωの抵抗測温センサを採用し、高い精度を経済的な価格で実現したハンディな温度計である。

LCD（液晶）を使用したデジタル表示桁の温度計である。

JIS に規定された白金抵抗測温計を温度検出器に使用しており、温度により抵抗変化が大きく 0.1℃までの読み取りが出来る。

また、電池電源のため小型軽量で持ち運びに便利である。

デジタル温度計 PD－600A の仕様を下の表 3 に示す。また、実物を写真 4 に表す。

表 3　デジタル温度計 PD－600A の仕様

センサ	白金　100Ω　全長146mm
測定範囲	-100～+199.9℃　0.1℃表示
表示	31/2桁　液晶デジタル
精度	±0.2℃ (+170℃以上±0.3℃)
使用温度範囲	0～50℃
電源	DC9V　006P乾電池　1個
大きさ	W62×D148×H23mm
重さ	170g
その他	1mケーブルつき

写真 4　デジタル温度計 PD－600A

3-3　温度校正

サーモトレーサ TH5104 を使い温度測定実験を行う前に、サーモトレーサ TH5104 の温度校正実験を行った。

3-3-1　サーモトレーサ TH5104 の放射率の決定

放射率の値はサーモトレーサ TH5104 の取扱説明書に載っている表 4 を参考に設定しようとした。表 4 ではアルミニウムの磨いた面は 0.04～0.06 となっているので、放射率補正の出来る最小値である 0.10 に設定して温度を測ってみた。しかし、室温と大きく離れた温度になり、放射率を 0.10、0.50、1.00 の 3 種類にして温度を測ってみると 1.00 の値が接触温度計で測った温度に最も近い事が分かった。したがって、1.00 を使用して測定を行った。TH5104 の取扱説明書に載っている放射率表を表 4 に示す。

また、1.00 が妥当であると判断した結果を、表 6 および図 1～4 に示す。

表 4　物質の状態及び温度と放射率表

物質		温度　℃	放射率　ε
アルミニウム	磨いた面	50～100	0.04～0.06
	ざらざらした面	20～50	0.06～0.07
	ひどく酸化させた面	50～500	0.20～0.30
	青銅色の面	20	0.60
	アルミの粉末	常温	0.16
鋳鉄		50	0.81
	インゴット	1000	0.95
	溶解した鋳鉄	1300	0.28
	600℃で酸化した鋳鉄	200600	0.64～0.78
	磨いた鋳鉄	200	0.21

表 5 の測定条件で温度校正を行った。

表 5　測定条件

測定条件	
場所	CAM室
室温	22.3℃
測定器具	サーモトレーサTH5104

表 6　放射率と温度の関係

アルミニウム		FC200鋳鉄	
放射率 ε	温度 (℃)	放射率 ε	温度 (℃)
0.1	103.5	0.1	99.4
0.5	39.7	0.5	38.7
1.0	18.7	1.0	18.1

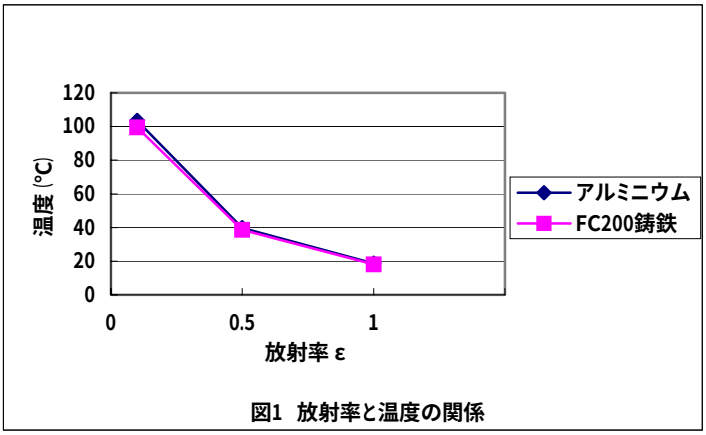


図1　放射率と温度の関係

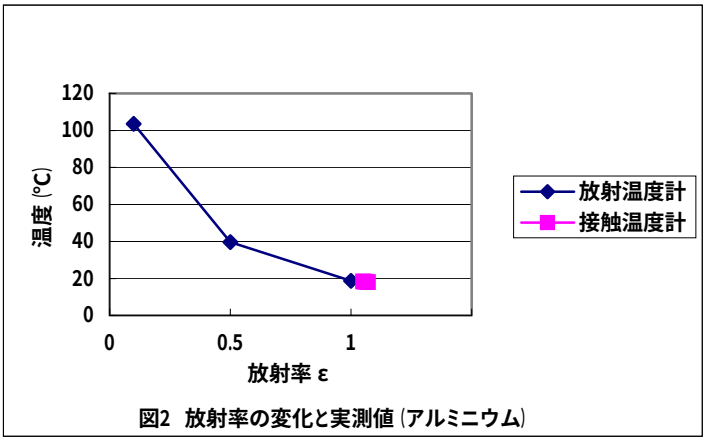


図2　放射率の変化と実測値 (アルミニウム)

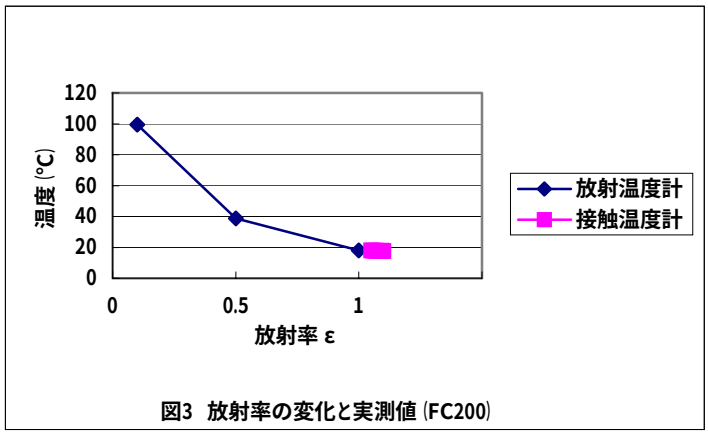


図3　放射率の変化と実測値 (FC200)

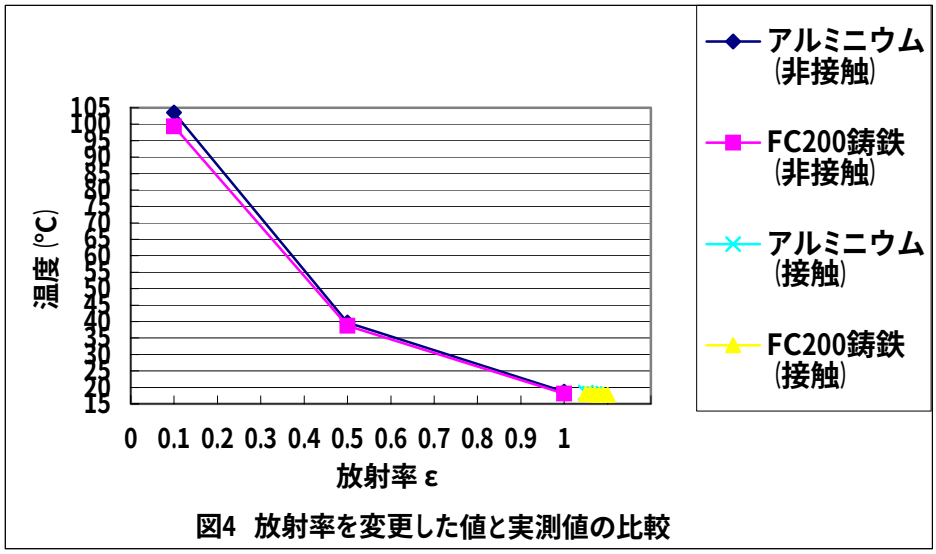


図4　放射率を変更した値と実測値の比較

温度校正の結果放射率 ε を表 7 のように決定した。

表 7　放射率の決定

シリンダブロック (FC200)	1.00
シリンダヘッド (アルミニウム)	1.00

サーモトレーサ TH5104 で図 5 及び図 6 に示す a～i までのポイントを設定し、それぞれのポイントでの温度を画面に表示させた。写真 5 は実機である。

写真 5　実機の写真

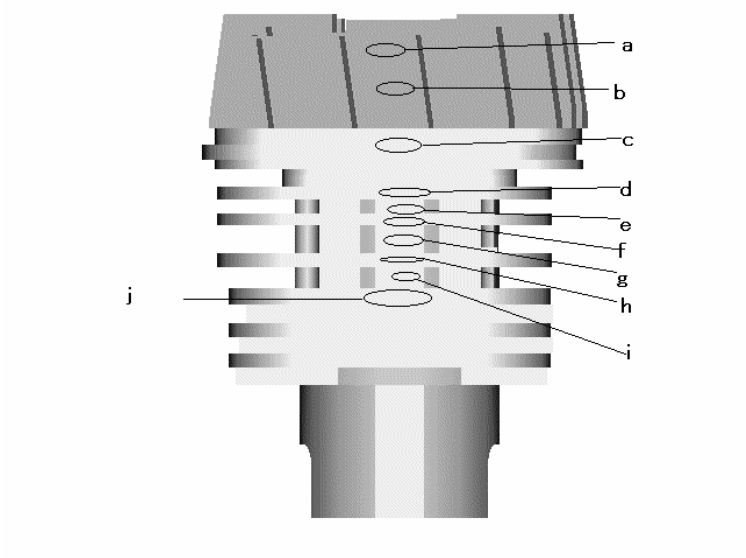


図 5　各ポイントの位置（正面図）

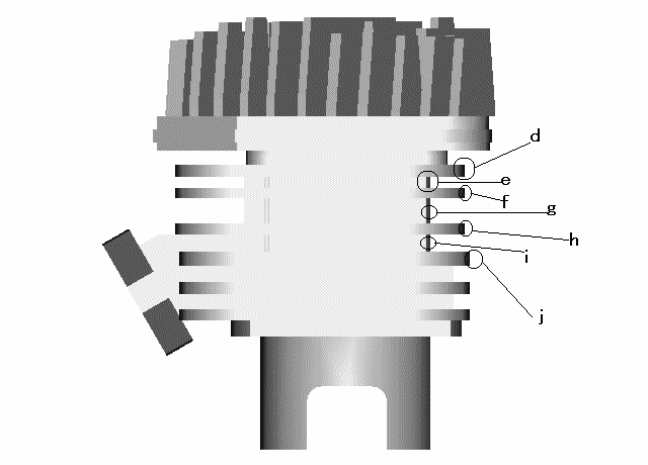


図 6　各ポイントの位置（側面図）

3-3-2　サーモトレーサ TH5104 と接触温度計の誤差の測定

このサーモトレーサ TH5104 の表示温度がどのくらい誤差があるのかを調べるために、室内でサーモトレーサ TH5104 の放射率 ε 1.00 と設定し、また SHIMADZU（島津理化学器械株式会社）製デジタル温度計 PD―600A を測定位置に接触させ、温度を測り比較した。

その結果を表 6 及び図 7 にまとめる。

表 6　非接触温度計と接触温度計の比較

	放射温度計のpoint	放射温度計の指示値 (℃)	接触温度計の指示値 (℃)
アルミニウム	a	20.3	18.4
	b	21.2	18.1
	c	21.7	18.0
鋳鉄	e	19.5	18.0
	f	19.6	17.9
	g	19.4	17.9
	h	19.3	17.7
	i	19.2	17.8
	j	20.1	17.7

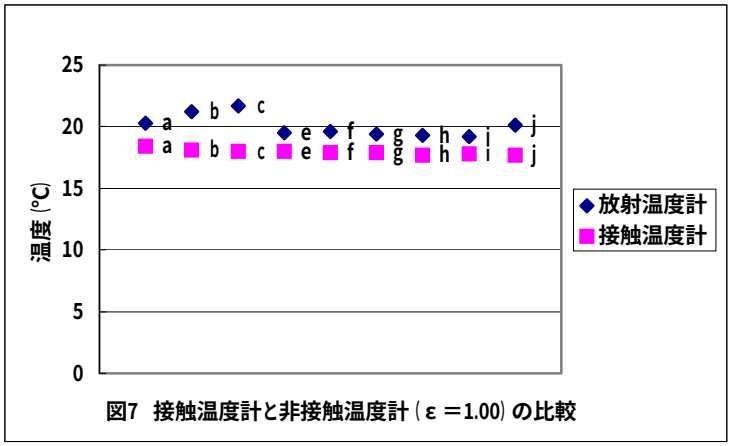


図7　接触温度計と非接触温度計（ε ＝1.00）の比較

サーモトレーサ TH5104 用の測定台を作り、シートベルト固定穴に固定をして実験を行った。測定台が無ければエンジンをかけた時の振動によってサーモトレーサ TH5104 で設定したポイント（放射率）がずれてしまい正確な温度データが取れないからである。固定台及び固定台にサーモトレーサ TH5104 を取り付けた様子を写真 5、6 に示す。

写真 6　固定台

写真 7　固定台に取り付けた様子

このサーモトレーサ TH5104 には VIDEO 出力端子が付いているので、そこからケーブルを通して、ビデオカメラ（SHARP 製液晶ビューカム）に表示させ測定している様子を録画（撮影）し温度の変化を読取るのに利用した。温度を表示させた画面を見ながらデータを読取った。

3-4　測定実験

実際の温度測定実験を行う。

ミニ自動車にタコメーターが無いので運転状態の正確な回転数はわからない。したがって、負荷を一定の状態を保つために写真 7 に示すようにアクセルワイヤーを引張った状態で木材をはさみ負荷をかける。実験としてはエンジンをかけて熱平衡になるまで図 8 に示すポイントを計測対象に温度測定をする。

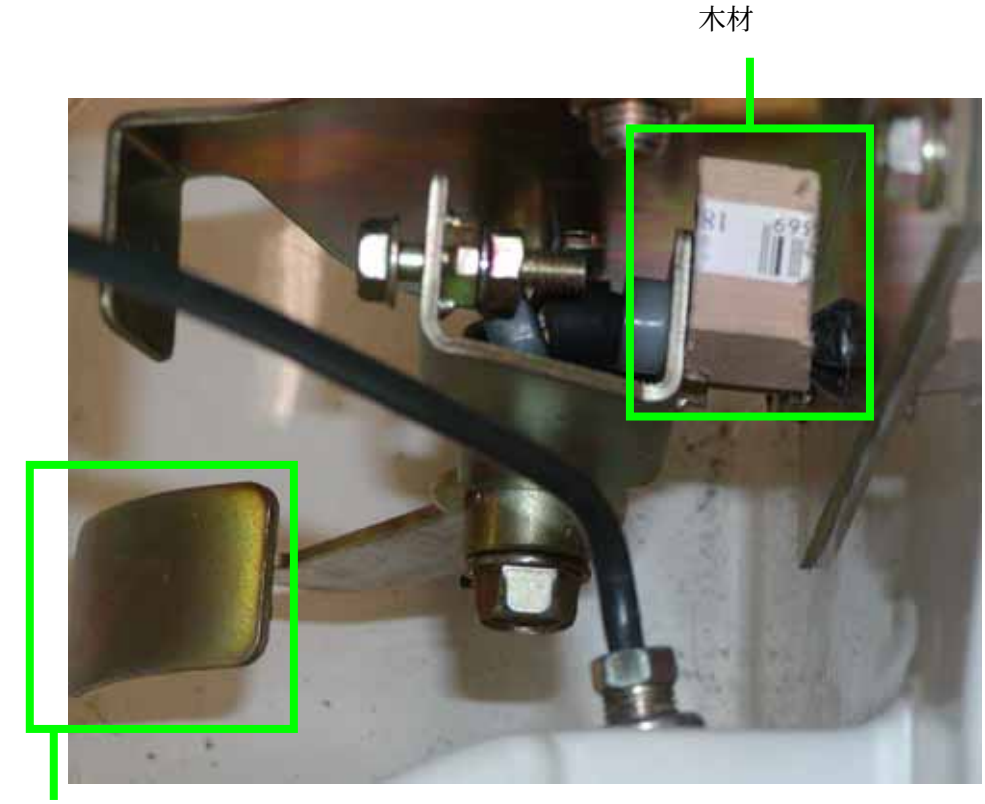


写真 8　アクセルを引張った状態

3-5　実験結果

表 7　実験条件

実験条件	
日時	平成15年12月8日
実験開始時刻	19時27分09秒
気温	6℃
挟んだ木材の厚さ	2.0cm
測定距離	シリンダブロック表面　19.7cm
	シリンダヘッド表面　21.2cm

実験で得られた結果を図 9 及び表 8 に示す。図 8 は実験のポイント位置である。

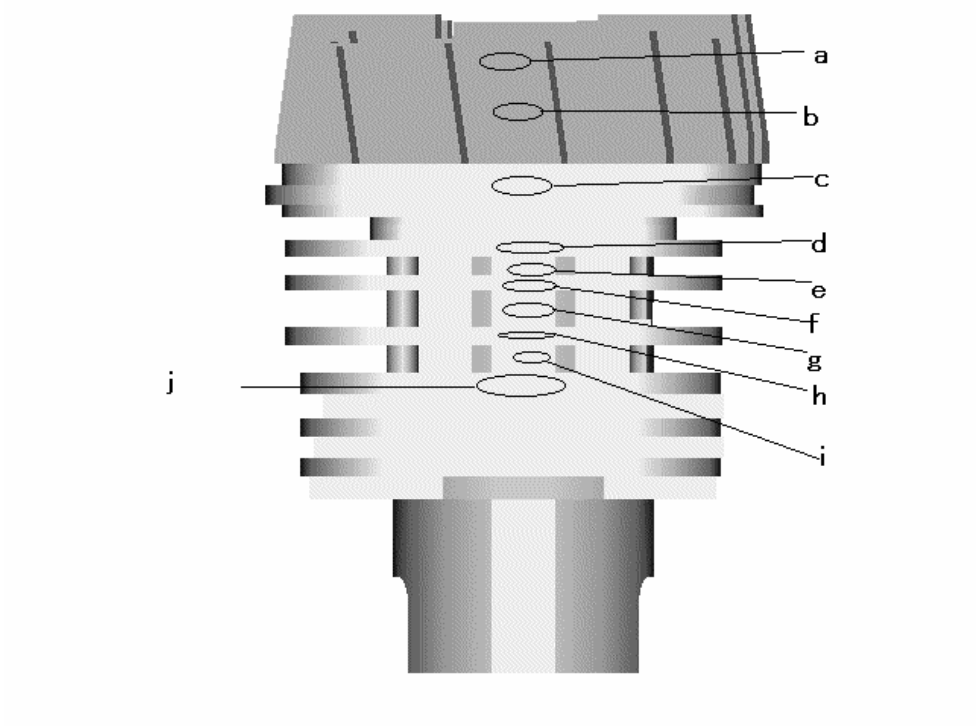


図 8　各ポイントの位置

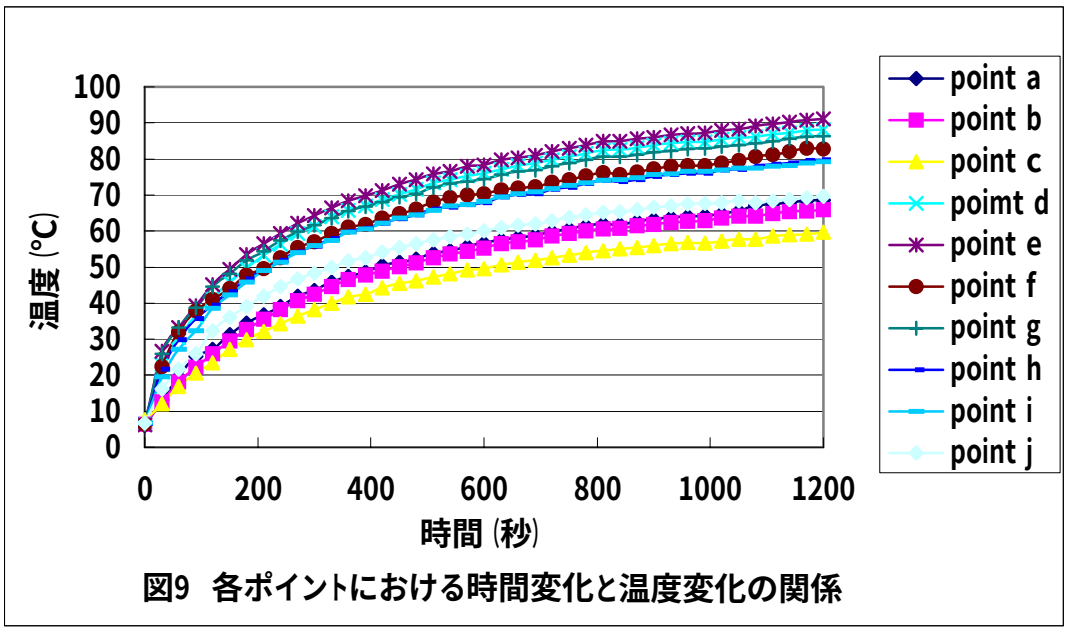


図9　各ポイントにおける時間変化と温度変化の関係

表 8　時間と温度の関係

	アルミニウム (℃)			FC200鋳鉄 (℃)						
時間 (秒)	point a	point b	point c	poimt d	point e	point f	point g	point h	point i	point j
0	6.0	6.4	7.6	6.4	6.3	6.4	6.4	6.5	6.7	6.7
30	13.1	12.6	12.1	22.9	26.7	22.4	25.9	21.6	19.6	16.2
60	19.5	18.1	16.9	30.4	33.3	31.9	33.3	29.9	27.1	21.6
90	25.2	22.2	20.6	36.4	39.2	37.8	38.7	35.7	32.4	25.9
120	27.2	25.9	23.5	41.4	45.2	41.1	44.6	39.4	38.6	32.3
150	31.2	29.5	27.1	45.8	49.4	44.0	48.2	43.2	42.2	36.0
180	34.5	32.7	29.9	49.8	53.4	47.8	51.9	46.7	45.8	39.0
210	36.7	35.5	32.1	53.2	56.4	49.6	54.4	49.1	49.0	41.9
240	39.1	38.2	34.3	56.3	59.3	52.6	57.3	51.8	51.4	44.5
270	41.9	40.6	36.4	59.3	62.2	55.4	59.9	54.2	54.0	46.7
300	43.6	42.4	38.2	61.3	64.3	57.1	61.7	55.8	56.0	48.3
330	45.8	44.5	39.9	63.9	66.4	59.3	63.6	57.9	57.4	50.0
360	47.4	46.6	41.8	65.8	68.4	61.1	65.6	59.8	59.7	51.7
390	48.6	47.7	42.4	67.0	69.8	61.9	66.7	60.7	60.6	52.6
420	50.4	48.8	44.3	68.7	71.3	63.6	68.1	62.2	62.1	54.2
450	51.4	50.1	45.4	70.2	73.0	64.8	69.5	63.4	63.6	55.4
480	52.2	51.2	46.1	71.6	74.2	66.1	70.4	64.5	64.5	56.5
510	53.8	52.5	47.3	73.3	75.9	68.1	72.1	66.0	65.8	57.5
540	54.6	53.6	48.2	74.2	76.6	69.2	73.1	66.6	67.0	58.5
570	55.8	54.4	49.2	75.3	77.9	70.0	73.8	67.4	67.4	59.2
600	56.6	55.2	49.6	76.1	78.3	70.3	74.5	67.9	68.2	60.0
630	57.6	56.4	50.6	77.1	79.7	71.4	75.7	69.4	69.5	60.9
660	58.3	57.0	51.4	78.2	80.3	72.0	76.6	70.2	70.4	61.6
690	58.8	57.6	51.8	78.8	81.0	72.3	76.9	70.3	70.9	62.0
720	59.8	58.6	52.5	79.7	82.0	73.5	77.9	71.5	71.8	62.9
750	60.6	59.3	53.2	80.6	82.9	74.2	78.8	72.2	72.7	63.8
780	61.4	60.0	54.0	81.6	83.9	75.3	79.7	73.1	73.3	64.4
810	62.0	60.6	54.5	82.5	84.9	76.2	80.6	74.0	74.1	65.1
840	61.9	60.7	55.0	82.6	84.9	75.7	80.6	73.8	74.2	65.3
870	62.7	61.5	55.4	83.2	85.6	76.3	81.2	74.3	74.8	65.9
900	63.3	61.9	55.9	83.8	86.0	77.3	81.8	75.1	75.6	66.6
930	63.7	62.4	56.4	84.4	86.7	77.9	82.3	75.7	75.9	66.9
960	64.1	62.7	56.8	84.7	87.1	78.2	82.7	76.1	76.6	67.5
990	64.3	62.8	56.7	84.7	87.3	78.2	82.9	76.1	76.5	67.6
1020	64.8	63.5	57.2	85.5	87.9	78.9	83.4	76.9	76.9	67.9
1050	65.6	64.2	57.8	86.0	88.2	79.6	83.8	77.1	77.5	68.4
1080	67.1	64.2	57.7	86.2	89.2	80.7	84.4	77.9	77.4	67.9
1110	67.5	64.8	58.6	86.8	89.7	81.2	84.9	78.5	77.9	68.3
1140	67.9	65.3	59.0	87.3	90.2	82.0	85.6	78.9	78.2	68.7
1170	68.3	65.6	59.2	87.9	90.7	82.9	86.2	79.6	78.9	69.2
1200	68.6	65.9	59.6	88.1	91.1	82.8	86.4	79.7	79.2	69.6

計 5 日間で 5 回の実験を行い温度データを計測する。その中で温度計測の結果が最も合理的だと思われる 1 回の温度データを採用する。

不合理なデータの理由

①爆発力を受けるフィンの付け根の方が低く、フィンの先端部の温度が高い。

②エンジンストップにより 20 分間のデータが取れない。

③一時的にセンサーの位置がずれるような異常が起きて、温度が急激に下がる。

これらの不合理なデータは削除する。

温度計測の全データは付録 1 を参照。

4 章　有限要素解析

4-1　解析の概要

実際に測定した温度測定実験の結果を使いエンジンのシリンダブロック及びシリンダヘッドの伝熱解析を行った。

4-2　解析装置

使用機器

使用解析ソフト：MSC/NASTRAN　for　Windows　Version.3.0
VisualNastran　for　Windows　2002
ABAQUS　Version.6.3

NASTRAN について：

MSC/NASTRAN は有限要素法（FEM）の手法を用いて広範囲のエンジニアリング問題を解くための大規模汎用構造解析プログラムである。解析機能としては、線形・非線形構造（静的、動的）解析、実・複素固有値解析、座屈固有値解析、動的応答解析（応答スペクトル解析、周波数応答解析、過度応答解析、ランダム応答解析)、伝熱解析、音響解析、周波数対称性、DMAP（ユーザカスタマイズ機能）等の機能がある。また、新しいバージョンでは CAD およびオフィスオートメーションへのアクセスが可能で、CAD 形状をインポートすることもできる。

4-3　解析モデル

解析モデルの作成は AUTO　CAD2000 で非軸対称モデルを作成した。非軸対称モデルの表面積を計算で出し、その結果を軸対称モデルにするために半径を導き出しその半径で解析モデルを作った。その半径を用いて MSC/NASTRAN　for　Windows　Version.3.0 でポイントを取り軸対称解析モデルを作った。

4-3-1　非軸対称モデル

完成していたエンジンからシリンダブロック及び、シリンダヘッドをはずしエンジンの詳細な寸法を実機についてノギスで計測し寸法を決定した。ノギスで測定した寸法を用いて AUTO　CAD2000 を使い非軸対称モデルを作成する。この CAD で作成した形状のデータを sat ファイルに変換して VisualNastran　for　windows2002 に送りモデルを作成する。

写真 8 はエンジン実機の写真である。また、図 10 及び図 11 は AUTO　CAD2000 で非軸対称モデルを作り、VisualNastran　for　windows2002 に送って作ったモデルである。

写真 8　エンジンの実機

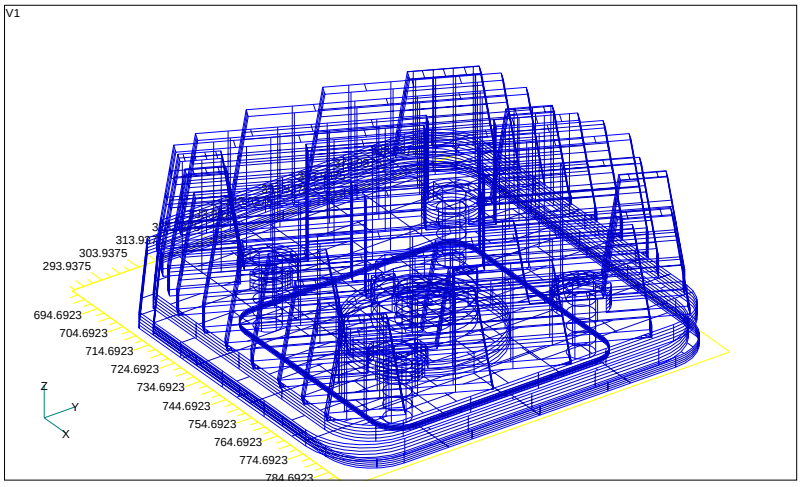


図 10　Nastran 図（シリンダヘッド）

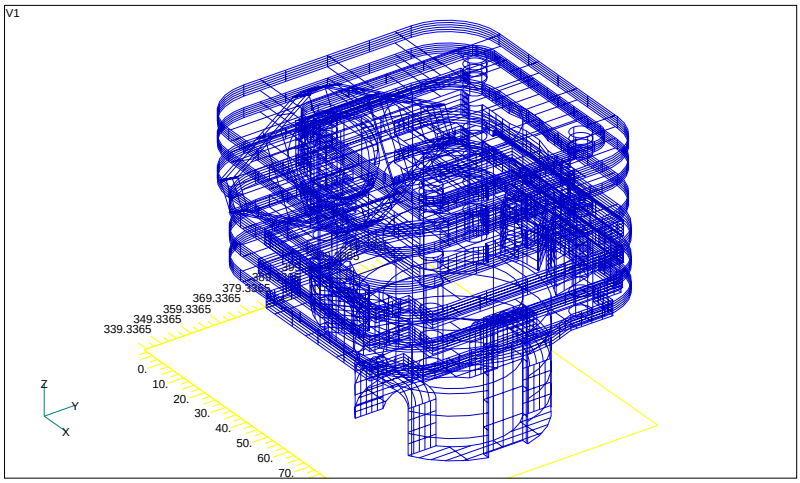


図 11　Nastran 図（シリンダブロック）

しかし、シリンダブロックの部分は VisualNastran　for　Windows2002 で要素が作成出来たが、しかし、シリンダヘッドの部分が VisualNastran　for　Windows2002 で要素が作成出来なかったので、軸対称モデルに換えている。

4-3-2　軸対称モデル

軸対称モデルはフィンの表面積を非軸対称モデルの表面積と同じにして放熱特性が等しくなるように解析モデルを作っている。フィンが付いている位置は非軸対称モデルにして、フィンの厚みも非軸対称モデルと同じにしている。非軸対称モデルから軸対称モデルへの変換の計算は付録 2 を参照。

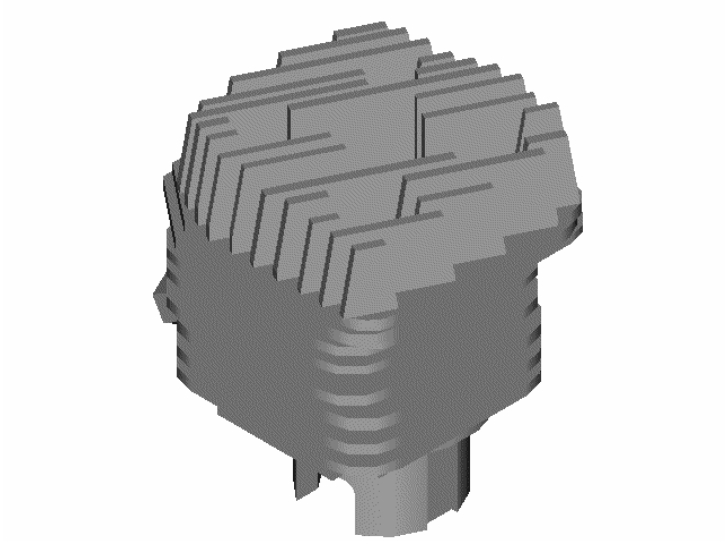


図 12　CAD 図非軸対称モデル

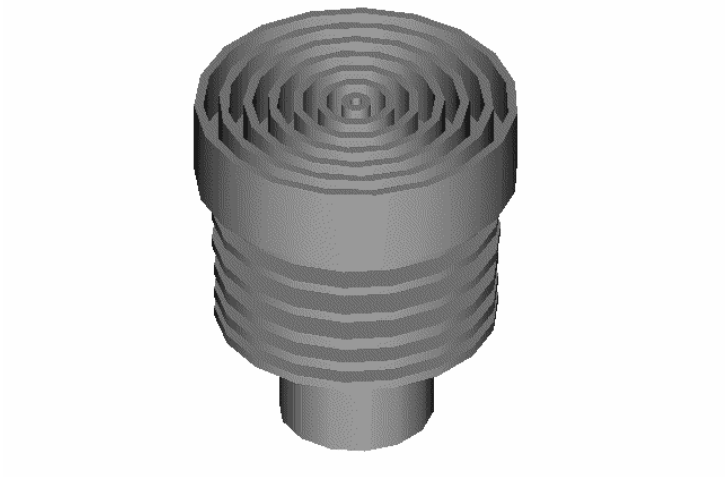


図 13　CAD 図軸対称モデル

4-3-3　解析モデル

解析モデルを図 14 に示す。軸対称でない実物のエンジンを軸対称モデルと考えて解析モデルを作った。解析モデルはシリンダブロックは内径 0.0193m、外径 0.0271mの円筒で、

高さ 0.0926m、フィンの厚さは実機と同じ厚さに揃え、フィンの位置も実機に揃え製作している。また、シリンダヘッドは高さ 0.0109m、半径 0.0566mの円柱状と考え、厚さ 0.00324 m、高さ 0.019m のフィンが 0.00529m間隔で縦方向に付いているモデルです。また、シリンダブロックのフィンの半径及びシリンダヘッドの半径は実機の表面積と軸対称モデルの表面積が同じであれば放熱量が同じと考え、計算をして半径を出している。

また、赤で線を引いた所をアルミニウムの表面とし、ここに 20W/（m/K）の自然対流条件を加えている。青で線を引いた部分を FC200 鋳鉄の表面としここに 10W/（m/K）の自然対流条件を加えている。この自然対流条件の値は自然対流の空気として考えたものである。また、緑の点線部分を対称軸として、このモデルではガスケット及び給排気系の穴などはモデルに入れていない。エンジン本体に固定するためのボルトもモデルに入れていない。ABAQUS に使用した材料物性の値としては 2-2-2 章の『エンジンの材料』の表 2 の値を使用した。また、図 15 は解析モデルを作るために使った実機の寸法である。図 16、17 は軸対称モデルの寸法である。

図 18 に示すように温度を与える条件を t1、t2、a、b というパラメーターを与えそこから解析の温度を与えた。温度パラメーターの考え方を図 19 に示す。詳しい inp データは付録 3 を参照。

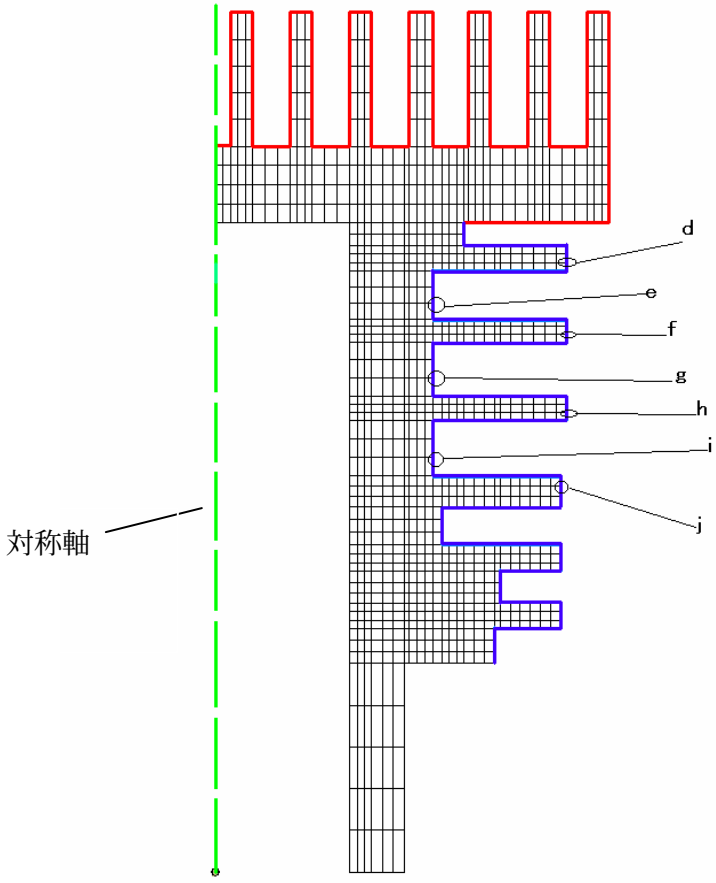


図 14　解析モデル

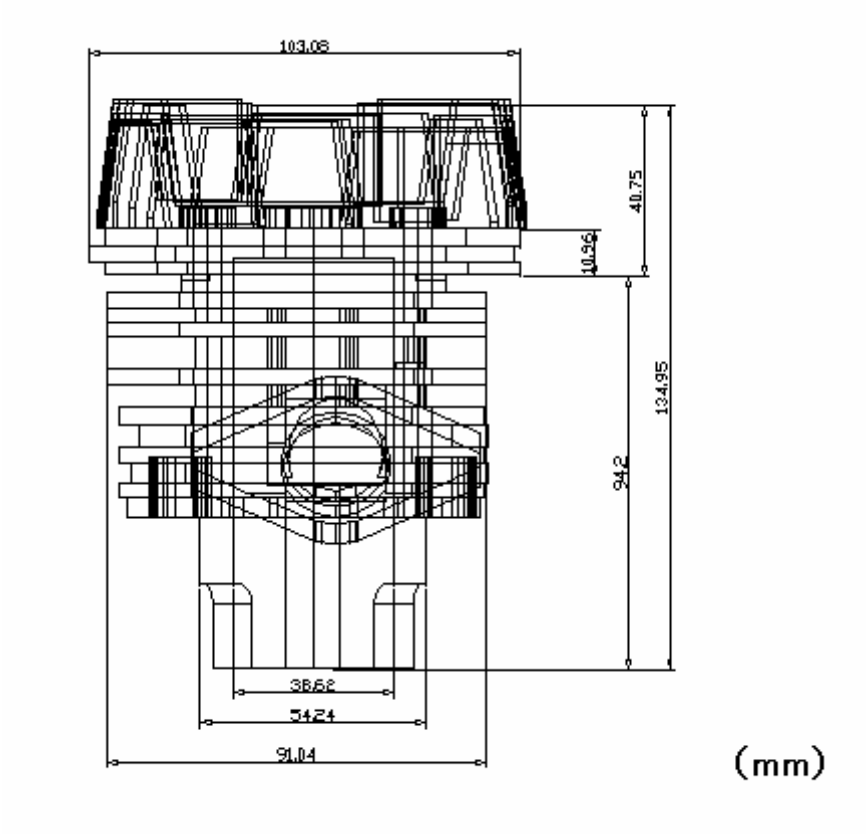


図 15　実物モデルの寸法

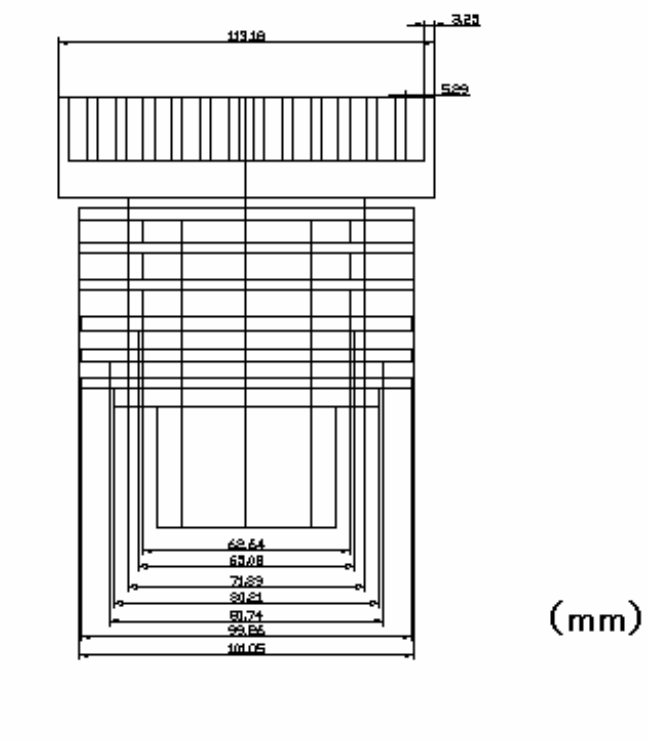


図 16　軸対称モデルの寸法 1

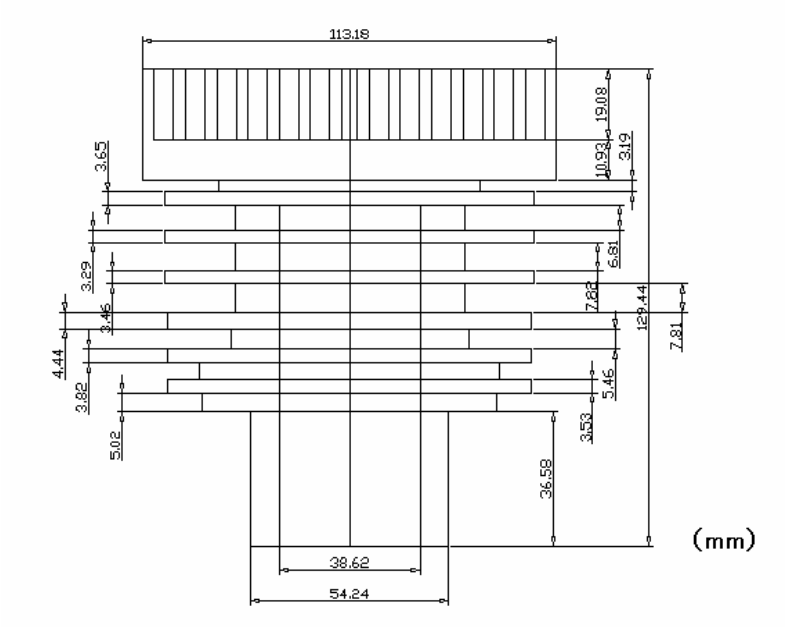


図 17　軸対称モデルの寸法 2

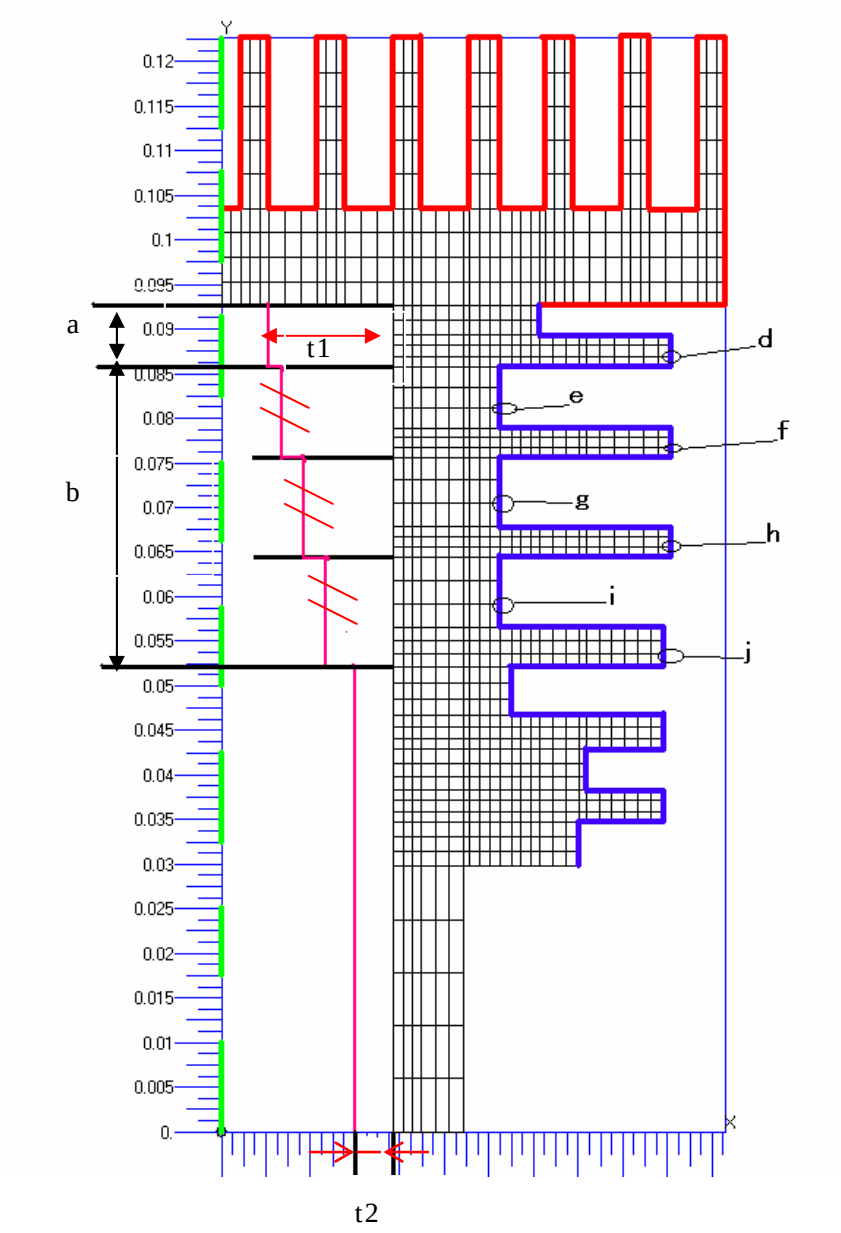


図 18　温度パラメーターの与え方

温度パラメーターを与えるために上死点に近い爆発力を一番受ける部分を t1、一番影響が少ない部分を t2 と考えて温度パラメーターを与えている。a のパラメーターは上死点と下死点の間で一番温度が高いと思われる部分の距離で、b のパラメーターはピストンが動く位置で最も温度が低い部分に向かって温度勾配をつける距離である。b の部分を 3 等分し温度も t1、t2 の温度差を 4 等分して解析の温度条件として与えている。

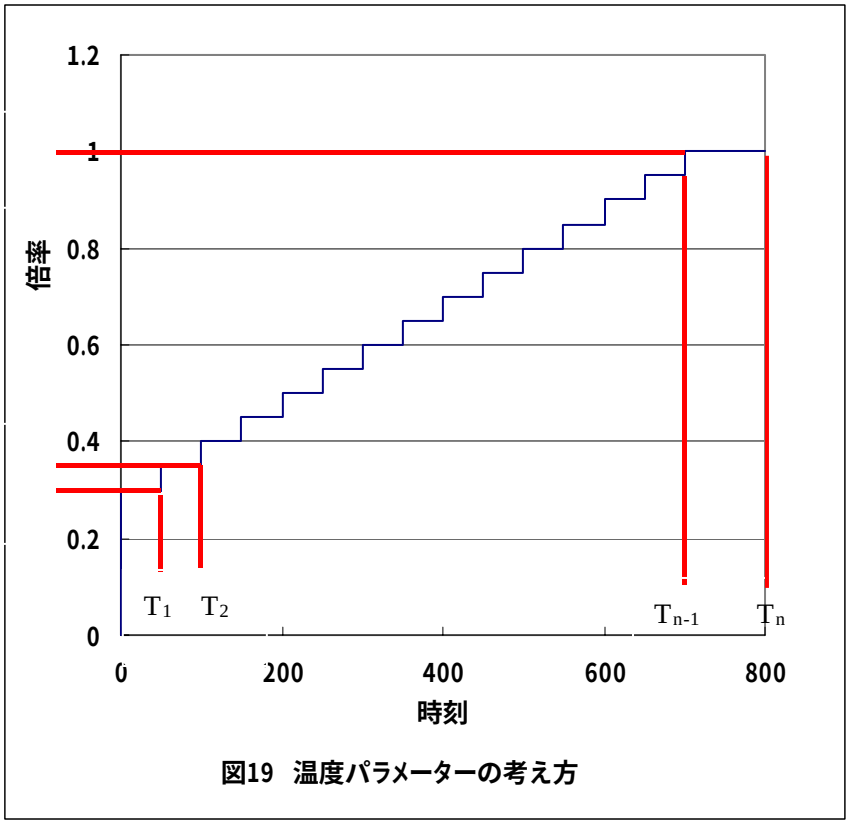


図19　温度パラメーターの考え方

時刻 0～T_1における温度の倍率をα_1、T_1～T_2における温度の倍率をα_2として最大温度の時刻T_{n-1}における温度の倍率をα_n＝1.00 にしてその間を各時刻T_iにおける実験の平均値の比で求めて、その値を各時間T_iにおける温度の倍率α_iとしている。

これら 2 つのパラメーターから中心部に与える温度を推測し解析を行うための温度条件を考えている。

4-4　数値解析

4-4-1　解析条件

今回の解析では FC200 鋳鉄部分のみを解析対象として行っている。

材料条件は表 2 の値を使う。これ以降は、初期温度との温度差を温度として取り扱うことにする。

また、今回の解析では、a、b のパラメーターは一定の距離にしている。a、b の距離を表 8 に示す。

表 8　a、b の距離

a	3.36×10^{-2}m
b	6.84×10^{-2}m

計測時間全体をT_nとする。時間T_iは実験で得られた外表面の温度変化の傾きが大きい $0\sim\frac{T_n}{2}$ は $\Delta T=\frac{T_n}{40}$ で温度の倍率を与え、外表面の温度変化の傾きが小さい $\frac{T_n}{2}\sim T_n$ は $\Delta T=\frac{T_n}{20}$ で温度の倍率を与える。このような方法で合計 30 分割した。

図 20　実験値の平均温度と時間の関係を示す。

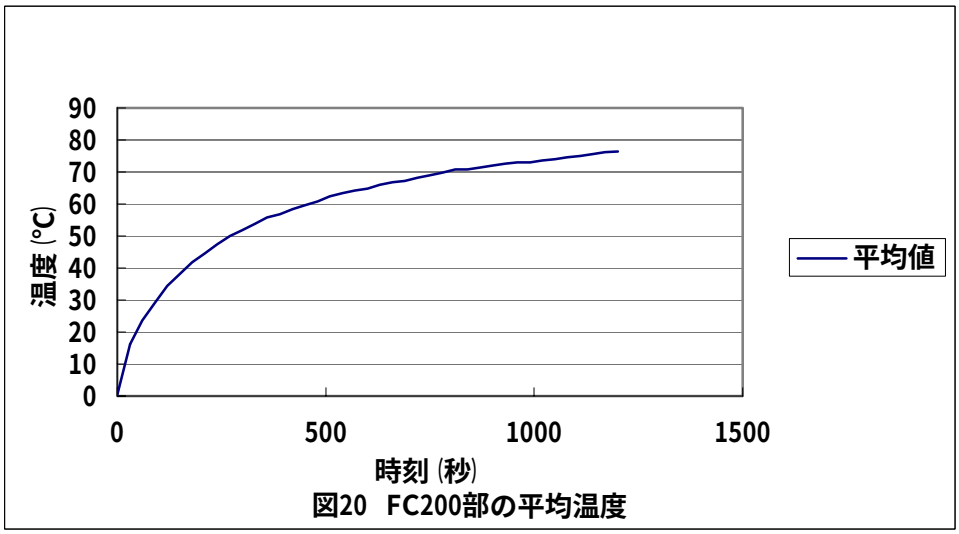


図20　FC200部の平均温度

温度の倍率α_iは実験値の時刻と平均温度の関係より（1）式で求める。

$$\alpha_i=\frac{\text{時刻}T_i\text{における温度差}}{\text{最終時刻における温度差}}\quad\cdots(1)$$

この温度倍率α_iをT_{i-1}からT_iに与えて解析を行う。

α_iを計算した結果を表 9 に示す。

表 9　時間と温度の倍率

i	時間T_i	温度の倍率α_i
1	30	0.212
2	60	0.309
3	90	0.382
4	120	0.450
5	150	0.499
6	180	0.547
7	210	0.583
8	240	0.619
9	270	0.654
10	300	0.678
11	330	0.704
12	360	0.729
13	390	0.743
14	420	0.763
15	450	0.781
16	480	0.796
17	510	0.816
18	540	0.829
19	570	0.839
20	600	0.847
21	660	0.874
22	720	0.892
23	780	0.915
24	840	0.926
25	900	0.943
26	960	0.955
27	1020	0.964
28	1080	0.975
29	1140	0.989
30	1200	1.00

4-4-2　解析方法

（1）温度のパラメーターt1 と t2 を決定するための解析を行う。

最終時刻における実験値の平均温度と解析で得られた平均温度を一致させるように t1 と t2 を決める。

実験値の時刻と温度の平均温度の関係を使い最終時刻の実験値の平均温度を出している。また、実験値の標準偏差を求めて、t1 と t2 を（2）式（3）式で予測し解析を行う。

$t1_1 = 平均値 + 2 \times 標準偏差$ ・・・(2)

$t2_1 = 平均値 - 2 \times 標準偏差$ ・・・(3)

表 9 に示すα_iを使用し解析を行った結果の最終時刻における解析結果の平均温度と実験結果の平均温度の比をβ_{n-1}として表すと（4）式のようになる。

$$\beta_{n-1} = \frac{最終時刻T_n の実験値平均温度}{最終時刻T_n の解析値の平均温度} \quad ・・・(4)$$

この比 β_{n-1} を用いて$t1_n$、$t2_n$を表すと次式のようになる。

$$t1_n = \beta_{n-1} \times t1_{n-1} \quad \cdots (5)$$

$$t2_n = \beta_{n-1} \times t2_{n-1} \quad \cdots (6)$$

これを繰り返すことによって、最終時刻における t1 と t2 を決定する。

$$0.990 \leq \frac{\text{最終時刻における実験値の平均温度}}{\text{最終時刻における解析値の平均温度}} \leq 1.01 \quad \cdots (7)$$

この（7）式を満たすような$t1_n$、$t2_n$を（8）式（9）式に代入してt_1、t_2を決める。

$$t1 = t1_n \quad \cdots (8)$$

$$t2 = t2_n \quad \cdots (9)$$

（2）温度の倍率を決定するための解析を行う。

時刻T_1、T_2、・・・、T_nで実験値の平均温度と解析で得られた平均温度を一致させるように温度の倍率α_1、α_2、・・・、α_nを決定する。

（1）で得られた温度パラメーターt1、t2 を使用する。まず、表 9 に示す温度倍率α_iを与える。温度の倍率α_iを変化させて、その時刻における温度を決定する。

実験値の平均温度より各時刻における温度の倍率を決定する。

この温度倍率を時刻T_{i-1}からT_iに与えて解析を行う。この解析の結果と実験値を比較して、この比を γ_{n-1} として表すと、

$$\gamma_{n-1} = \frac{T_i\text{における実験値の平均温度}}{T_i\text{における解析値の平均温度}} \quad \cdots (10)$$

この比 γ_{n-1} を使い時刻T_iにおける倍率α_iを表すと、式（11）のようになる。

$$\alpha_{in} = \gamma_{n-1} \times \alpha_{in-1} \quad \cdots (11)$$

このα_{in}が次式を満たすようになるまで繰り返し計算を行う。

$$0.990 \leq \frac{T_i\text{における実験値の平均温度}}{T_i\text{における解析値の平均温度}} \leq 1.01 \quad \cdots (12)$$

この（12）式をみたすようなα_{in}を（13）式に代入してα_iを決める。

$$\alpha_i = \alpha_{in} \quad \cdots (13)$$

4-4-3　解析結果

（1）温度のパラメーターt1 と t2 を決定するための解析結果

表 10 は t1 と t2 を決めるために行う解析の中間結果である。

表 10　解析の中間結果

最終時刻における温度			
	平均温度 (℃)	標準偏差 (℃)	
実験値	76.4	6.61	
1回目	77.4	5.39	
2回目	76.5	5.32	
	パラメーター		実験値との比率
回数i	$t1_i$ (℃)	$t2_i$ (℃)	
1	89.6	63.2	0.987
2	88.5	62.4	1.00

この結果より t1＝88.5℃、t2＝62.4℃と決定する。

図 21 は実験値の平均温度と解析値の比較である。

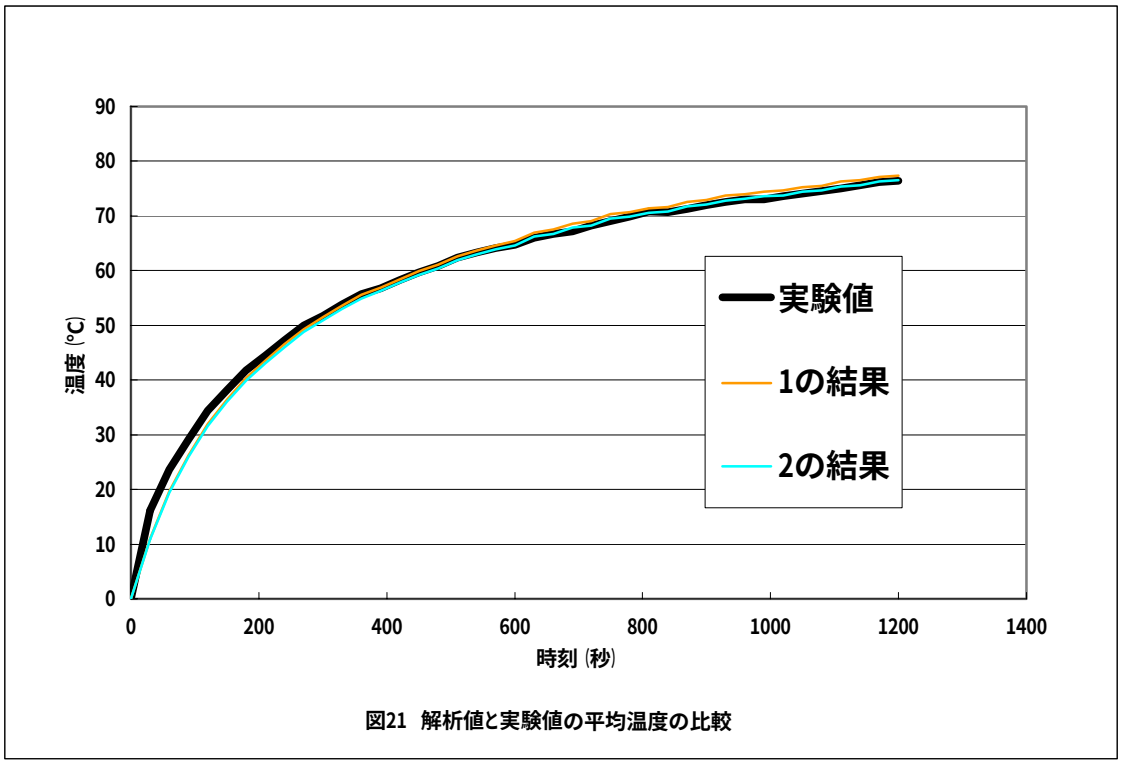


図21　解析値と実験値の平均温度の比較

図 22、23 は各時刻における実験値と解析値の温度差のグラフを示す。図 22 は 1 回目、図 23 は 2 回目の解析結果である。ここにおける温度差は実験値－解析値である。

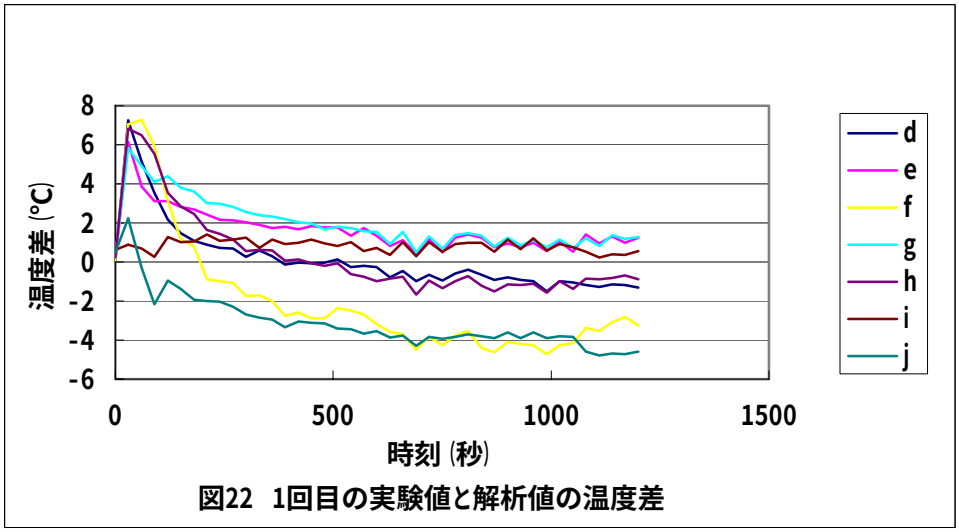


図22　1回目の実験値と解析値の温度差

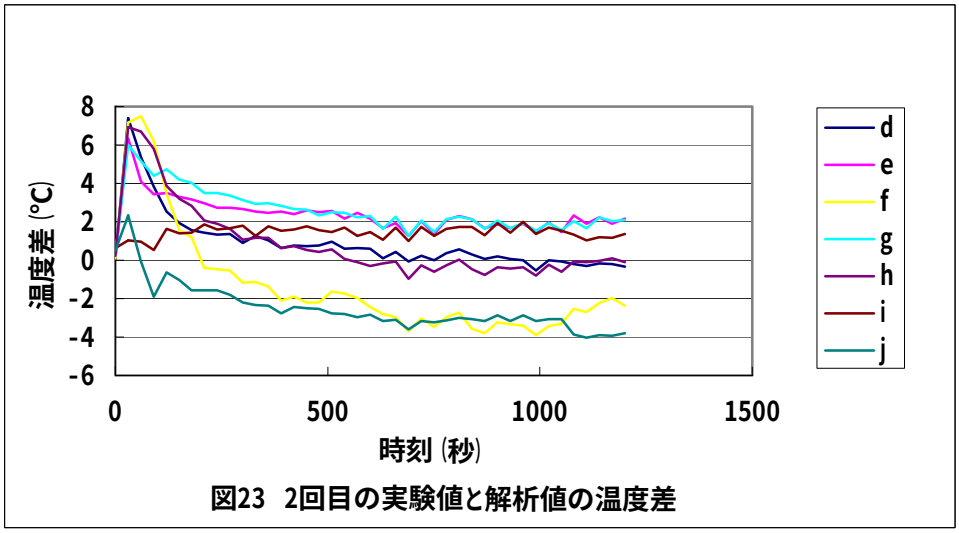


図23　2回目の実験値と解析値の温度差

図 22、23 両方とも同じような傾向を示している。最終時刻における温度差が図 22 では 1.5℃から－4.5℃の範囲内に入っている。図 23 では 2℃から－4℃の範囲に入っている。$t1_n$、$t2_n$ を減少させているので、各ポイントにおける温度差が増加していると考えられる。

図 24、25 に温度差の時間積分のグラフを示す。

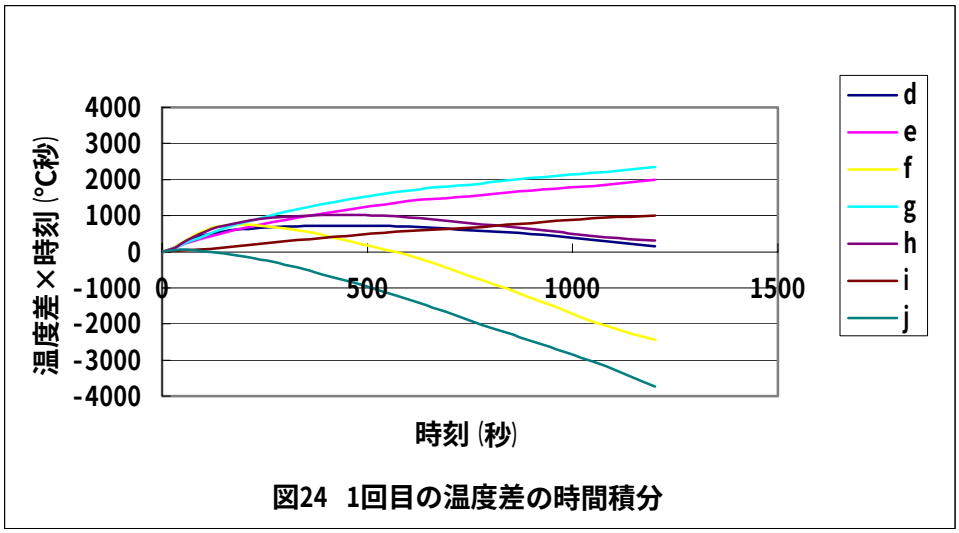


図24　1回目の温度差の時間積分

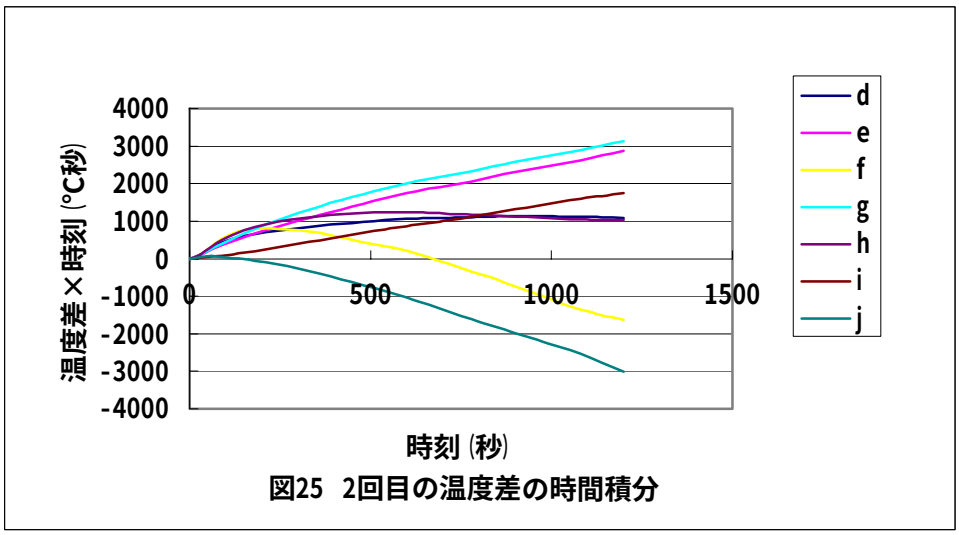


図25　2回目の温度差の時間積分

図 24、25 の両グラフとも同様の傾向を示している。$t1_n$、$t2_n$を下げることによって時間積分の値が約 750℃秒増加している。実験値の温度が一定の値なので解析値の温度が低くなると差が増大するので増加する。e、f、g、jのポイントでは時間積分は多くなっている。

最終時刻における温度差の時間積分の値を表 11 にまとめる。

表 11　各ポイントにおける時間積分

	e (℃秒)	f (℃秒)	g (℃秒)	i (℃秒)
1回目	1980	-2430	2540	-3730
2回目	2870	-1630	3140	-3010

（2）温度の倍率を決定するための解析結果

（1）で決定した最終時刻におけるt1、t2 を使い各時刻における温度の倍率を決定する。各時刻での温度の倍率を決定するために表 9 の初期のα_iを使い解析を行い出てきた時刻T_iにおける実験値と解析値の比を取りα_iを修正したものである。1 回目→2 回目→3 回目の順序で修正していき 3 回目で（12）式を満たした。

表 12 は温度の倍率の一覧表である。

表 12　温度の倍率一覧

		実験値	1回目		2回目		3回目		比率
時刻i	t_i (秒)	平均温度 (℃)	初期α	平均温度 (℃)	修正α	平均温度 (℃)	修正α	平均温度 (℃)	実験値/解析値
1	30	16.2	0.212	10.9	0.315	16.1	0.315	16.1	1.01
2	60	23.6	0.309	19.4	0.377	24.6	0.363	23.9	0.991
3	90	29.2	0.382	26.0	0.428	30.1	0.415	29.2	1.00
4	120	34.4	0.450	31.6	0.489	35.0	0.480	34.2	1.00
5	150	38.1	0.499	36.0	0.528	38.6	0.520	38.0	1.00
6	180	41.8	0.547	40.0	0.571	42.1	0.571	41.9	1.00
7	210	44.5	0.583	43.1	0.602	44.8	0.602	44.7	1.00
8	240	47.3	0.619	46.0	0.637	47.5	0.637	47.4	1.00
9	270	50.0	0.654	48.8	0.670	50.1	0.670	50.1	1.00
10	300	51.8	0.678	50.9	0.690	51.9	0.690	51.9	1.00
11	330	53.8	0.704	53.0	0.715	53.9	0.715	53.9	1.00
12	360	55.7	0.729	54.9	0.740	55.8	0.740	55.8	1.00
13	390	56.8	0.743	56.3	0.749	56.9	0.749	56.9	1.00
14	420	58.3	0.763	57.8	0.770	58.3	0.770	58.3	1.00
15	450	59.7	0.781	59.2	0.788	59.7	0.788	59.7	1.00
16	480	60.8	0.796	60.4	0.801	60.9	0.801	60.9	1.00
17	510	62.4	0.816	61.9	0.823	62.4	0.823	62.4	1.00
18	540	63.3	0.829	63.0	0.833	63.4	0.833	63.4	1.00
19	570	64.1	0.839	63.9	0.839	64.1	0.839	64.1	1.00
20	600	64.8	0.847	64.6	0.847	64.7	0.847	64.7	1.00
21	660	66.8	0.874	66.7	0.874	66.7	0.874	66.7	1.00
22	720	68.2	0.892	68.2	0.892	68.2	0.892	68.2	1.00
23	780	69.9	0.915	69.9	0.915	69.9	0.915	69.9	1.00
24	840	70.7	0.926	70.8	0.926	70.8	0.926	70.8	1.00
25	900	72.0	0.943	72.1	0.943	72.1	0.943	72.1	1.00
26	960	73.0	0.955	73.1	0.955	73.1	0.955	73.1	1.00
27	1020	73.6	0.964	73.8	0.964	73.8	0.964	73.8	1.00
28	1080	74.5	0.975	74.7	0.975	74.7	0.975	74.7	1.00
29	1140	75.6	0.989	75.7	0.989	75.7	0.989	75.7	1.00
30	1200	76.4	1.000	76.5	1.000	76.5	1.000	76.5	1.00

図 26 は実験値と解析値を比較したものである。

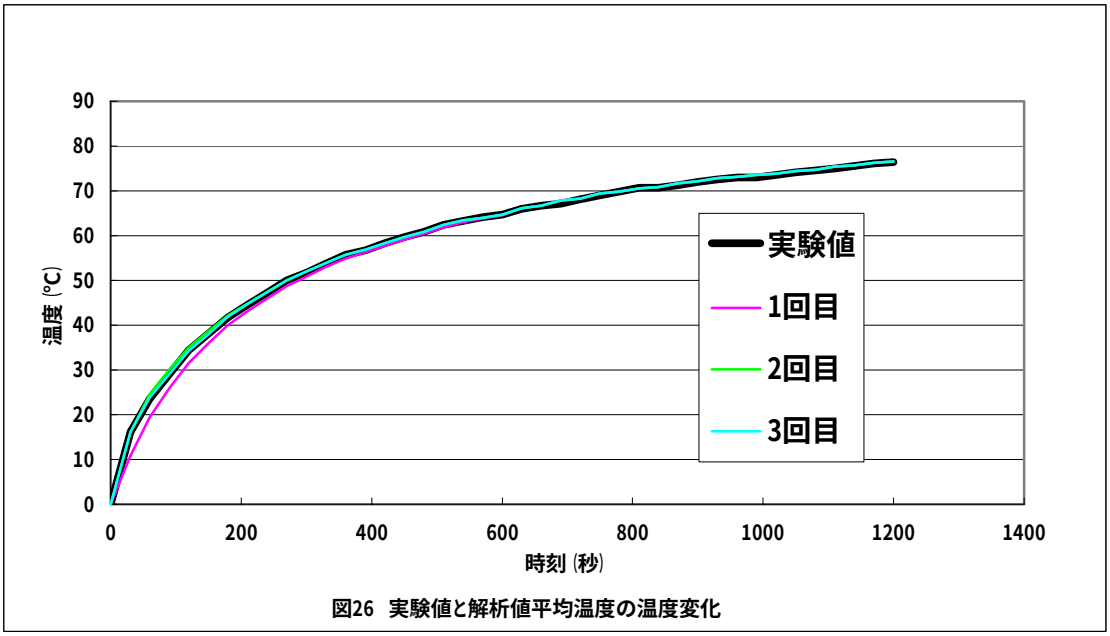


図26　実験値と解析値平均温度の温度変化

図 27～29 には各時刻における実験値と解析値の温度差のグラフを示す。ここにおける温度差は実験値から解析値を引いたものである。

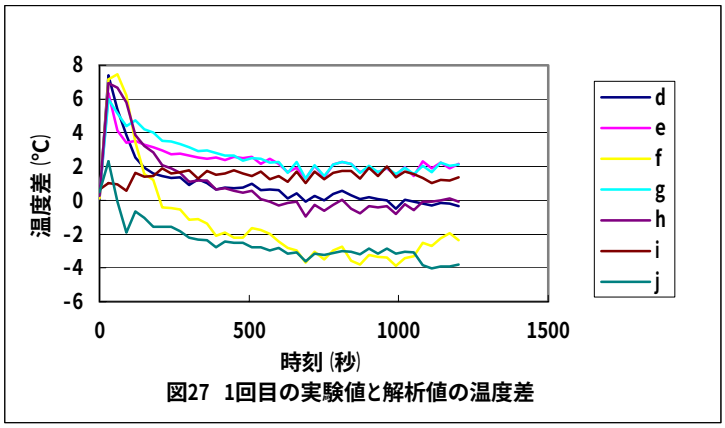


図27　1回目の実験値と解析値の温度差

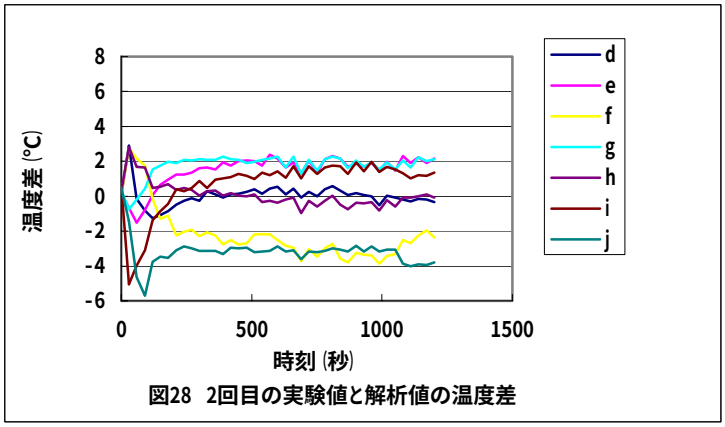


図28　2回目の実験値と解析値の温度差

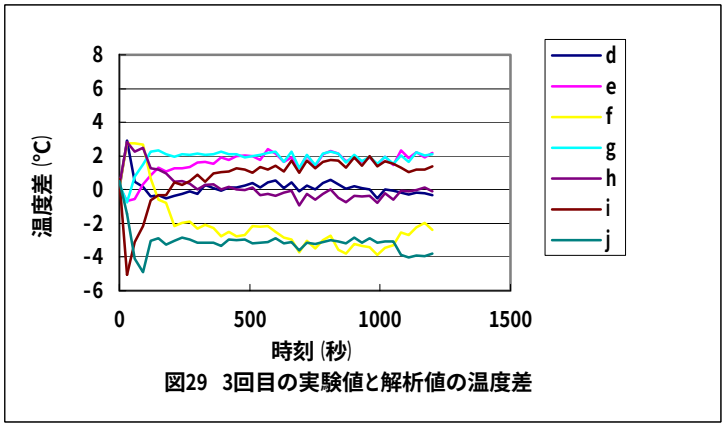


図29　3回目の実験値と解析値の温度差

図 27～29 のグラフでは時刻が 0～100 秒の間での温度差が大きくなっている。また、図 27～29 のグラフを比較すると 1 回目→2 回目→3 回目の順序で温度差が一定になる時間が早くなっていると考えられる。図 27 では、0～500 秒ぐらいまで変動が大きくそれ以降は

ほぼ一定になっている。図 28 では 0〜370 秒ぐらいまで変動が大きくそれ以降はほぼ一定になっている。図 29 では 0〜250 秒ぐらいまで変動が大きくそれ以降はほぼ一定になっている。図 27〜29 で共通に実験値が解析値より高くなっている部分に入っているのは内部の燃焼による直接熱を受ける部分に近いフィンの根元部分で 0 に近い値をとっているのはフィンの先端部分である。f の位置はうまく合っていない。また、燃焼熱をあまり受けないと考えられる j の位置では合っていない。

図 30～32 に温度差の時間積分のグラフを示す。

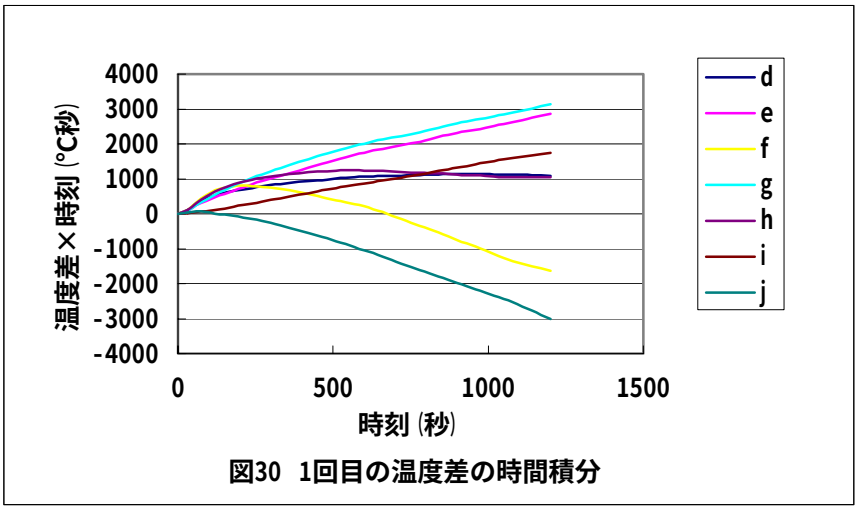


図30　1回目の温度差の時間積分

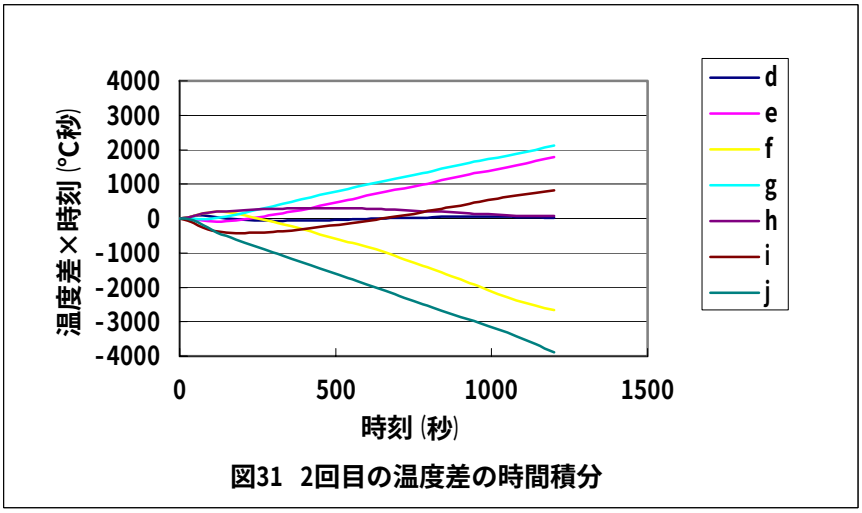


図31　2回目の温度差の時間積分

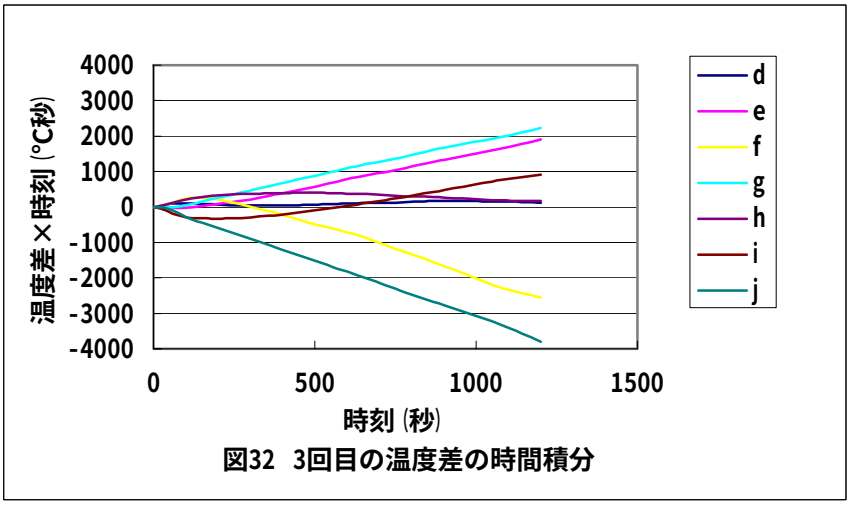


図32　3回目の温度差の時間積分

図 30～32 より回数を重ねるごとに温度差の時間積分値の傾きが一定になっていると考え

られるので、図 27～29 で温度差が一定になっている事と関連している。図 31、32 ではフィンの先端部分 d、h では段々0 にむかって収束していくと考えられる。しかし f、j はフィンの先端だが発散していくと考えられる。

図 33～35 は温度の倍率を変化させたグラフである。

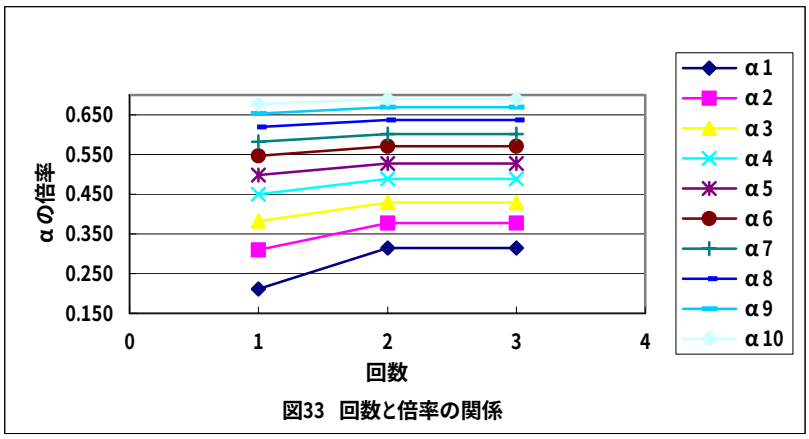


図33　回数と倍率の関係

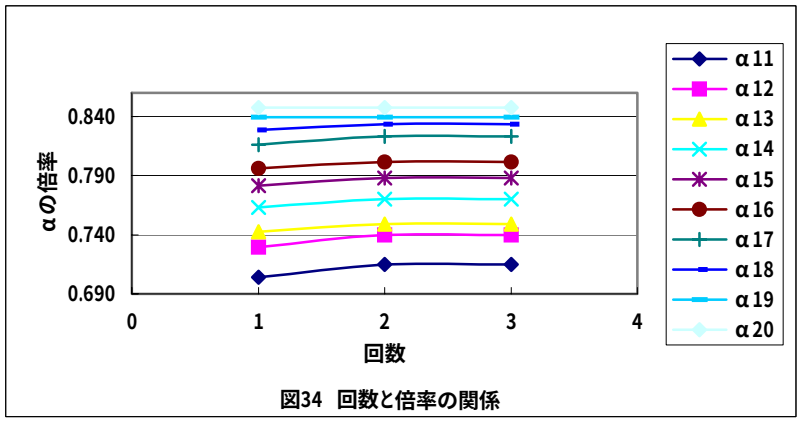


図34　回数と倍率の関係

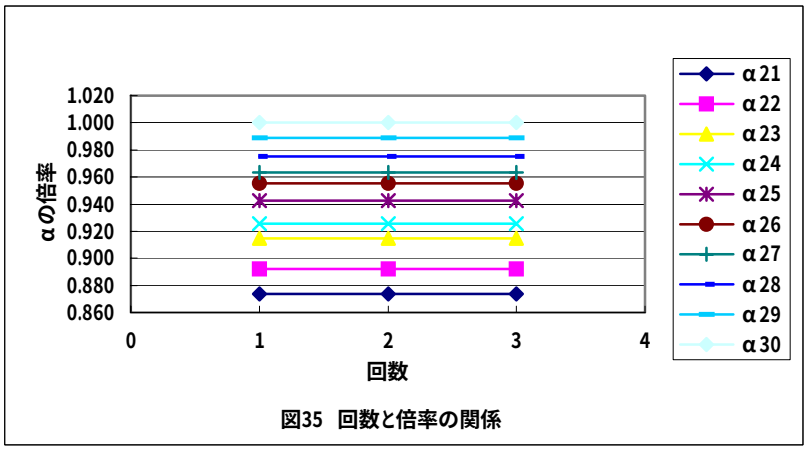


図35　回数と倍率の関係

図 33～35 より α_iはiが小さな値の時は温度の倍率が大きく変化しているが、iが大きくなるにつれて倍率の変化が見られない。したがって、初期の段階では温度変化の傾きが大き

い事がわかる。

最終的に t1、t2 に与えた温度の変化を図 36 に示す。

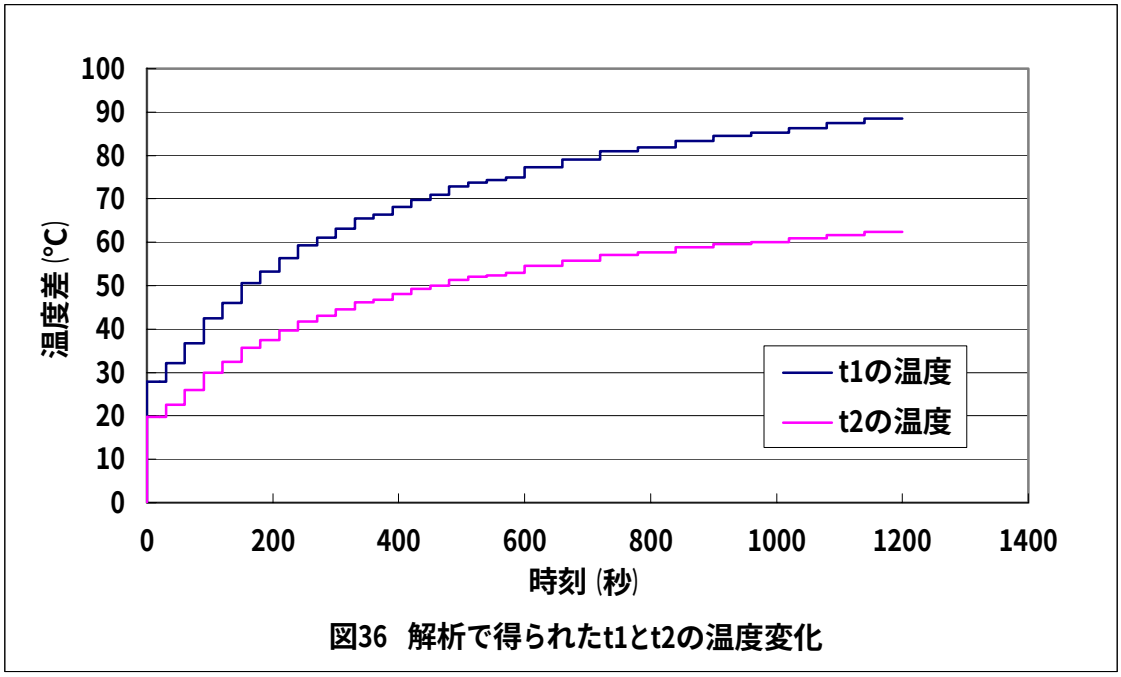


図36　解析で得られたt1とt2の温度変化

図 36 では初期の段階での温度変化の傾きが大きいが、時間が増えていくにしたがって温度の変化傾きが少なくなっている。

5 章　考察

今回研究では、実験値の平均温度と解析値の平均温度で温度差が 1%以内に抑えるように解析を行ってきた。そのため、実験値の平均温度と解析値の平均温度を推定することが出来た。

温度の倍率を決定する為の解析では、徐々に温度差が減少していき、温度差が一定になる時間も短くなっていった。1 回目では約 8℃で温度差が一定になるまでの時間が 500 秒以降だったのが 2 回目では約 6℃で温度差が一定になるまでの時間が 370 秒以降、3 回目では約 5℃で温度差が一定になるまでの時間が 250 秒以降に減少した。

温度差の時間積分のグラフを見ると最終的には一定の傾きを持っているので温度差はほぼ一定の値になっていた。

温度の倍率を示すグラフはα_iの値が小さい所では大きく倍率が変化し値が大きい部分では倍率があまり変化しなかった。

t1、t2 の温度変化のグラフでは初期の時刻が段階で温度の勾配が大きく、時刻が遅くなれば温度勾配が緩やかになっていく事がわかった。

今回の解析では形状を軸対称で近似した熱伝達解析を行うことにより、実物のエンジンの内部の温度を推定できた。

温度の空間分布は階段状として、温度の倍率が空間で一定とし解析を簡略化できた。

本研究で採用した仮定は妥当なものと考えられる。

6 章　結言

本研究ではエンジンの外表面の温度を実際に測定しその測定結果をもとに FEM 解析を用いて内部の温度分布を推定する技術を得る事を目的として解析を行ってきた。

1. 温度測定実験を行って、計測データを取得する。

まず、エンジンの組み立てを行い外表面の温度を非接触温度計を使用し、エンジンの外表面の温度変化を計測した。その際エンジンの振動で設定したポイントがずれてしまうため専用の固定台を作り、温度計をミニ自動車に固定した。

2. 熱伝達解析を行ってエンジン内部の熱が外表面に伝わる状況を計測した。

軸対称モデルで表面に自然対流の要素を貼り付けて解析モデルを作成した。

温度分布を表すパラメーターを与え非定常熱伝達解析を行った。

3. 実験による計測結果を再現するために内部の温度分布を推定する。

温度分布を表すパラメーターを与えて非定常解析を行った結果と実験で得られた結果を

合わせる為にパラメーターによる平均温度の合せ込みを行った。

結果として実験値の平均温度と解析値の平均温度で温度差が 1%以内に抑えるように解析を行う事が出来た。そのため、実験値の平均温度から解析値の平均温度で内部の温度分布を推定することが出来た。しかし、部分的に実験値の温度と解析値の温度を 1%以内に抑えるような解析を行う事が出来なかった。

内部の温度測定が難しく外表面の温度の計測は比較的容易であるので、この方法を使えば内部の温度分布の平均値を推定することが出来る。

この技術が進歩していけば設計開発の技術にも応用できる。

今後の課題

今回は一定の値として解析を行った自然対流条件などを測りなおす。

参考文献

（1）山縣裕　1998　現代の錬金術（エンジン用材料の科学と技術）　山海堂
（2）村山正・常元秀幸　1999　自動車エンジン工学　山海堂
（3）1997 サーモトレーサーTH5104 取扱説明書　NEC 三栄株式会社
（4）1997　TH51-701 熱画像処理プログラム取扱説明書　NEC 三栄株式会社
（5）FUJITSUホームページhttp://www.fqs.fujitsu.com/cae/pkg/cfdesign_faq1.html
（6）http://www.tri.pref.osaka.jp/kankou/news/No71/TRI-SERIES.html

謝辞

本研究を取り組むにあたって、多大なご指導、ご高閲をいただいた近畿大学生物理工学部基礎機械工学科安全性シミュレーション研究室所属渋江唯司教授に感謝の意を示します。また、本研究の実験を行うために、サーモトレーサ TH5104 を借用した同校熱工学研究室所属澤井徹助教授、接触温度計を借用した同校生体機械材料強度学研究室所属時政勝行教授、ABAQUS の設定をしていただいた同校生体機能シミュレーション研究室所属大政光史講師にお礼申し上げます。解析を行うためのご指導、ご助言を頂いた同校卒業生岡西健太郎氏、ミニ自動車の製作のお手伝い頂いた同大学院機械工学専攻の院生の方々、同校熱工学研究室所属獅野和幸君にお礼申し上げます。

最後に本研究でご指導いただきました近畿大学生物理工学部基礎機械工学科安全性シミュレーション研究室所属の 4 年生の皆様にもお礼申し上げます。

付録 1　実験で計測した温度の全データ

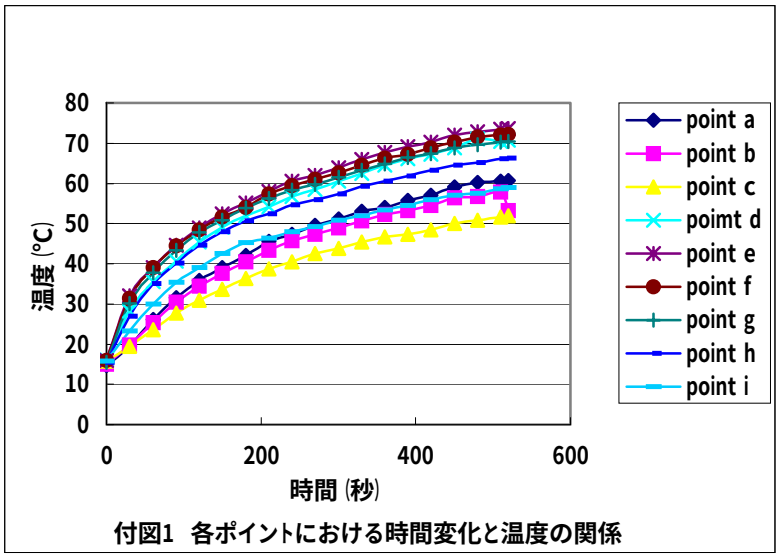
実験で計測した 5 日分のデータを付録として載せる。

付表 1　実験条件一覧

パターン	実験条件		
1	日時	平成15年11月28日	
	実験開始時刻	19時00分00秒	付図1
	気温	15℃	
	挟んだ木材の厚さ	0cm（アイドリング状態）	
	測定距離	シリンダブロック表面　19.7cm	
		シリンダヘッド表面　21.2cm	付表2
	備考	8分40秒エンジンストップ	
2	日時	平成15年12月2日	
	実験開始時刻	18時47分25秒	付図2
	気温	10℃	
	挟んだ木材の厚さ	0cm（アイドリング状態）	
	測定距離	シリンダブロック表面　19.7cm	付表3
		シリンダヘッド表面　21.2cm	
3	日時	平成15年12月3日	
	実験開始時刻	19時00分00秒	付図3
	気温	7℃	
	挟んだ木材の厚さ	0cm（アイドリング状態）	
	測定距離	シリンダブロック表面　19.7cm	
		シリンダヘッド表面　21.2cm	付表4
	備考	18分04秒エンジンストップ	
4	日時	平成15年12月4日	
	実験開始時刻	18時44分11秒	付図4
	気温	8℃	
	挟んだ木材の厚さ	1.7cm	
	測定距離	シリンダブロック表面　19.7cm	付表5
		シリンダヘッド表面　21.2cm	
5	日時	平成15年12月8日	付図5
	実験開始時刻	19時27分09秒	
	気温	6℃	
	挟んだ木材の厚さ	2.0cm	
	測定距離	シリンダブロック表面　19.7cm	付表6
		シリンダヘッド表面　21.2cm	

実験結果

パターン 1

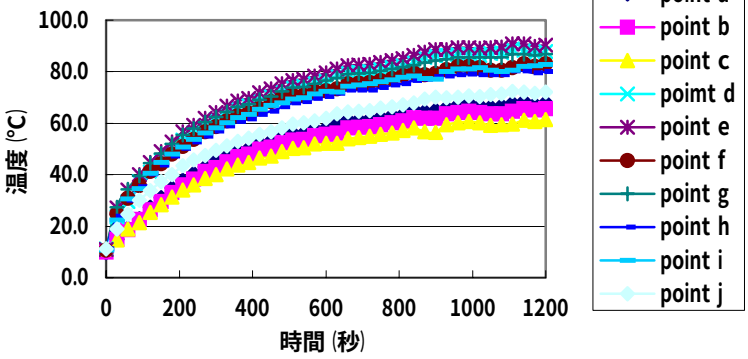


付図1　各ポイントにおける時間変化と温度の関係

付表 2　時間と温度の関係

	アルミニウム			FC200鋳鉄					
時間 (秒)	point a	point b	point c	poimt d	point e	point f	point g	point h	point i
0	14.6	15.0	15.8	16.1	16.0	16.0	15.5	15.5	15.7
30	19.4	19.7	19.5	28.2	32.0	31.4	30.1	26.9	23.3
60	26.2	25.3	23.6	35.5	39.1	39.1	37.8	35.0	30.0
90	31.5	30.4	27.8	40.6	44.7	44.5	43.4	40.2	35.3
120	35.9	34.5	30.9	45.4	48.9	48.5	47.8	44.6	39.1
150	39.1	37.6	33.7	49.1	52.4	51.7	50.9	47.9	42.5
180	42.0	40.4	36.3	51.9	55.2	54.1	53.8	50.6	45.2
210	45.5	43.4	38.7	54.2	58.0	57.3	56.3	52.5	46.4
240	47.3	45.8	40.5	56.8	60.5	59.5	58.3	54.7	47.9
270	49.6	47.4	42.5	58.5	62.0	61.0	59.7	55.9	49.2
300	51.1	49.0	43.8	60.6	63.9	62.7	61.5	57.4	50.9
330	53.1	50.6	45.4	62.4	65.9	64.6	63.3	59.3	52.0
360	54.0	52.3	46.7	64.6	67.7	66.3	64.9	60.6	53.4
390	55.7	53.2	47.4	66.1	69.2	67.3	66.4	61.9	54.5
420	57.1	54.5	48.5	67.3	70.2	68.9	67.4	63.3	55.9
450	59.1	56.4	50.1	68.8	72.1	70.3	68.8	64.6	57.0
480	60.2	56.8	50.9	71.0	72.9	71.5	69.7	65.1	57.6
510	60.6	57.8	51.7	70.4	73.5	72.0	70.2	66.1	58.7
520	60.7	53.2	51.9	70.7	73.7	72.2	70.5	66.3	59.0

パターン 2

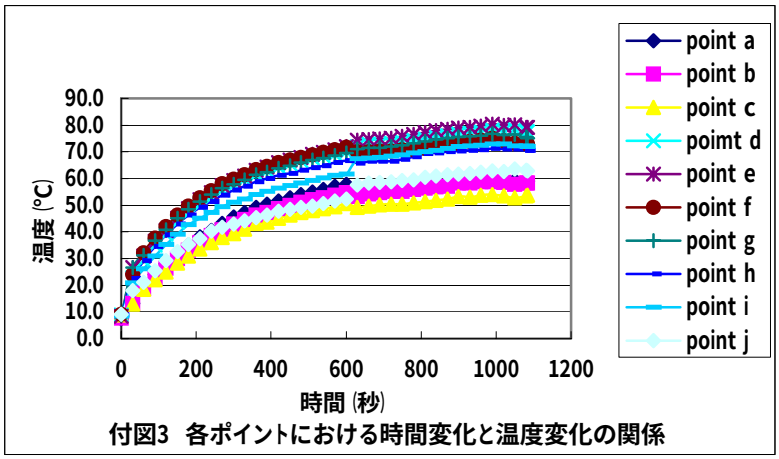


付図2　各ポイントにおける時間変化と温度変化の関係

付表 3　時間と温度の関係

	アルミニウム (℃)			FC200鋳鉄 (℃)						
時間 (秒)	point a	point b	point c	poimt d	point e	point f	point g	point h	point i	point j
0	9.8	9.9	11.1	11.1	11.0	10.8	11.1	11.2	10.8	11.2
30	14.9	14.9	14.8	23.7	27.2	25.0	27.3	23.9	22.3	18.9
60	19.1	18.7	18.8	29.7	34.2	30.8	34.3	30.0	30.7	24.6
90	23.0	22.6	21.5	37.2	40.1	35.8	39.6	35.4	34.7	30.2
120	27.4	26.4	25.3	41.1	44.7	41.3	44.6	40.3	40.5	33.9
150	31.1	29.6	28.4	45.5	49.1	44.2	48.3	43.7	44.7	37.3
180	34.8	33.2	31.4	49.4	52.8	48.1	52.0	47.3	48.1	40.1
210	37.8	36.0	34.0	53.6	56.8	51.0	55.4	50.3	50.7	43.6
240	40.5	38.3	36.0	56.2	59.3	53.8	57.9	52.8	53.7	45.8
270	43.0	41.3	38.5	59.0	62.0	56.7	60.4	54.9	56.3	47.6
300	45.5	42.8	40.1	61.5	64.3	58.7	62.4	56.9	58.1	49.6
330	47.3	45.0	42.2	63.5	66.6	61.0	64.5	59.0	60.2	51.2
360	49.4	46.9	43.7	65.7	68.6	62.9	66.3	60.8	62.3	52.9
390	50.3	48.0	44.9	66.9	69.7	63.9	67.4	61.6	63.4	54.2
420	52.4	49.9	46.6	68.9	71.8	65.7	69.1	63.5	65.3	55.6
450	53.2	50.8	47.3	70.3	73.5	68.3	70.4	64.8	66.8	56.8
480	55.1	52.4	49.0	72.4	75.3	70.0	72.4	66.5	68.0	58.3
510	56.2	53.6	50.2	73.8	76.6	70.8	73.8	68.0	69.4	59.6
540	56.3	53.8	50.4	74.3	77.1	70.9	74.1	68.4	69.9	60.1
570	57.9	55.3	51.9	75.6	78.4	72.3	75.4	69.6	71.3	60.9
600	58.3	55.6	52.3	76.4	79.5	72.7	76.5	70.3	72.3	61.9
630	59.7	56.1	52.3	78.5	81.0	73.3	77.7	71.6	72.1	63.8
660	61.4	58.2	54.1	79.6	82.3	75.3	79.1	72.8	74.3	64.5
690	61.5	58.4	54.6	79.8	82.5	75.5	79.4	72.9	75.0	64.7
720	61.6	58.7	55.0	80.2	82.8	75.8	79.5	73.0	75.4	65.0
750	62.4	59.5	55.8	80.8	83.5	76.6	80.3	73.9	76.0	65.9
780	63.1	60.1	56.2	81.7	84.4	77.4	81.2	74.8	76.9	66.4
810	63.4	61.0	57.1	82.3	85.1	78.5	81.9	75.3	77.8	67.1
840	65.4	62.2	58.3	83.7	86.3	79.6	82.7	76.5	78.4	67.8
870	64.8	61.9	56.8	85.6	87.6	78.8	83.7	77.0	77.4	69.3
900	65.1	62.0	56.4	86.2	88.5	79.3	84.4	78.0	77.0	70.1
930	66.2	63.6	59.4	86.3	88.5	80.8	84.8	78.4	80.0	69.9
960	67.2	64.3	60.2	86.6	89.2	82.0	85.5	78.9	81.0	70.2
990	67.8	64.7	60.6	86.9	89.4	82.0	85.6	79.1	81.2	70.7
1020	67.0	64.3	60.2	86.3	89.1	81.5	85.5	78.8	81.6	70.5
1050	66.3	63.6	59.3	87.1	89.3	80.6	85.6	78.9	80.6	71.1
1080	67.0	63.7	59.4	87.3	89.6	80.5	85.6	78.9	80.0	71.5
1110	67.8	64.7	59.8	88.7	90.9	81.7	86.7	80.4	80.6	72.4
1140	68.6	65.6	61.3	88.3	90.7	83.2	86.9	80.3	82.1	72.1
1170	67.4	65.1	60.7	87.1	89.9	82.1	86.3	79.6	82.4	71.6
1200	68.2	65.6	61.4	87.7	90.2	83.2	86.7	80.2	82.8	72.1

パターン 3

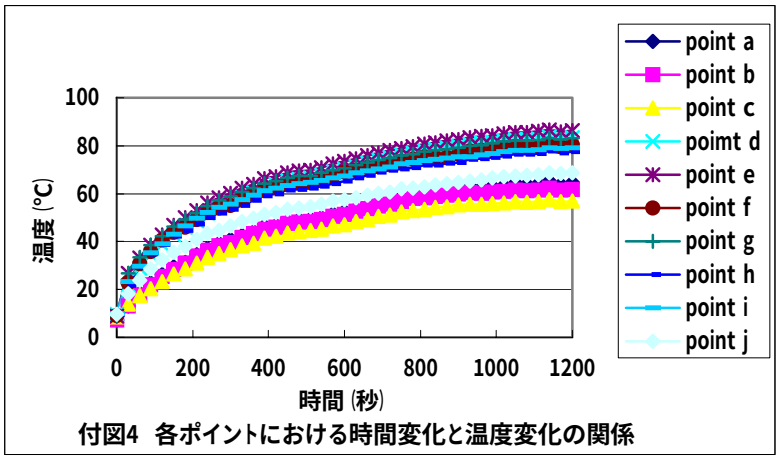


付図3　各ポイントにおける時間変化と温度変化の関係

付表 4　時間と温度の関係

	アルミニウム (℃)			FC200鋳鉄 (℃)						
時間 (秒)	point a	point b	point c	poimt d	point e	point f	point g	point h	point i	point j
0	7.4	7.7	8.8	8.9	8.5	9.1	9.0	8.9	8.5	9.1
30	13.3	13.1	13.0	22.8	26.6	24.1	26.7	22.5	20.8	17.9
60	19.5	18.7	18.5	29.4	31.0	32.2	31.3	29.2	26.1	21.1
90	23.9	22.8	22.1	35.0	36.4	37.6	36.6	34.5	30.9	25.4
120	28.1	26.5	24.9	39.1	40.5	42.0	40.9	38.8	35.4	29.4
150	31.9	30.1	28.4	43.7	45.2	46.3	45.2	43.0	39.1	32.7
180	35.1	33.1	30.9	47.0	48.8	49.8	48.5	46.4	42.6	35.2
210	38.1	36.1	33.7	50.1	52.0	52.9	51.3	49.1	45.2	37.4
240	40.5	38.7	35.9	52.9	54.7	55.5	53.9	51.4	47.4	40.4
270	43.3	40.9	37.9	55.6	57.3	58.0	56.3	53.8	49.5	41.7
300	45.6	43.0	39.4	57.6	59.3	59.8	57.9	55.6	51.0	42.9
330	47.2	44.6	41.0	59.7	61.0	61.5	59.6	57.0	52.3	44.2
360	49.1	46.4	43.3	61.5	63.1	63.3	61.4	58.8	54.0	45.4
390	50.4	47.4	43.8	63.0	64.4	64.6	62.5	59.9	55.1	46.4
420	51.7	48.8	45.2	64.3	65.9	66.0	63.8	61.1	56.3	47.7
450	52.8	49.9	46.2	65.4	66.9	66.9	64.9	62.0	57.3	48.5
480	54.1	51.0	47.2	66.7	67.9	68.0	65.9	63.2	58.3	49.3
510	55.0	52.0	48.0	67.7	69.1	68.9	66.9	64.1	59.4	49.8
540	56.0	52.8	48.8	68.4	69.9	69.8	67.7	64.7	60.2	50.6
570	57.1	53.8	49.5	69.1	70.9	70.7	68.6	65.9	61.1	51.7
600	57.8	54.7	50.6	70.1	72.0	71.8	69.5	66.7	61.7	52.3
630	54.2	53.3	49.2	72.1	74.4	70.1	71.0	65.8	67.4	57.7
660	54.9	54.3	49.8	72.9	74.6	70.1	71.5	66.4	67.8	58.3
690	55.2	54.7	50.1	73.0	74.8	70.3	71.4	66.5	68.0	58.6
720	55.5	55.2	50.4	73.3	75.1	70.4	71.9	66.6	68.4	58.8
750	56.0	55.1	50.4	73.8	75.8	70.7	72.4	67.1	68.9	59.4
780	56.4	56.0	50.9	74.3	76.5	70.7	73.2	68.2	69.5	59.6
810	56.8	56.5	51.4	75.0	77.3	71.3	74.0	69.3	70.0	60.4
840	57.4	56.9	51.9	75.6	78.0	72.4	74.7	69.7	70.6	60.9
870	57.9	57.2	52.4	76.1	78.4	72.9	75.1	70.0	71.2	61.4
900	58.5	58.2	53.3	76.8	79.0	73.1	75.6	70.4	71.9	61.8
930	58.8	58.2	53.0	77.1	79.2	73.9	75.8	70.5	72.2	62.0
960	59.1	58.8	53.7	77.6	79.6	74.4	76.1	70.7	72.4	62.3
990	59.5	58.9	53.9	78.3	80.3	75.2	76.8	71.2	73.0	62.9
1020	59.0	58.6	53.5	77.8	80.0	74.2	76.4	71.1	73.0	62.7
1050	59.3	57.8	52.7	78.5	80.1	73.2	76.5	71.0	72.3	63.7
1080	59.3	58.3	53.5	77.5	79.2	73.2	75.6	70.6	72.2	63.1
1084	59.1	58.3	53.7	77.6	79.2	73.0	75.2	70.6	72.1	63.0

パターン 4

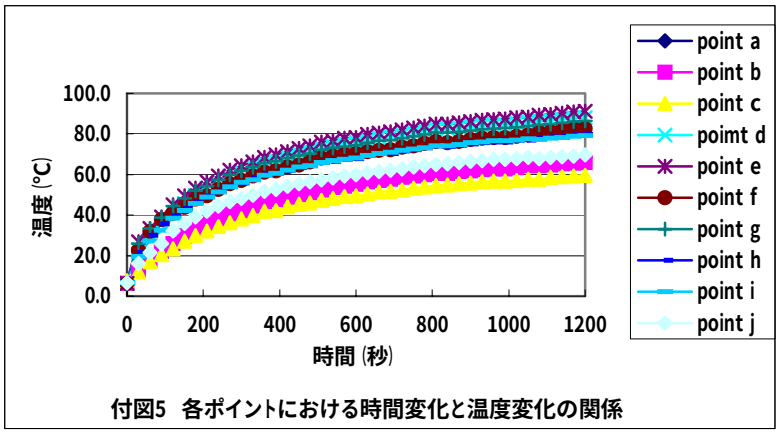


付図4　各ポイントにおける時間変化と温度変化の関係

付表 5　時間と温度の関係

	アルミニウム			FC200鋳鉄						
時間 (秒)	point a	point b	point c	poimt d	point e	point f	point g	point h	point i	point j
0	7.1	7.1	8.6	9.7	8.7	9.0	9.1	9.6	9.9	9.6
30	13.1	13.1	14.0	21.6	26.8	22.8	26.7	21.7	23.3	18.3
60	18.4	17.7	17.5	29.0	33.2	30.7	33.5	29.4	29.6	23.9
90	22.8	21.9	20.3	34.6	38.5	35.8	38.5	34.7	35.2	28.6
120	26.3	25.3	23.3	38.7	42.7	40.6	42.2	38.7	39.1	32.4
150	29.4	28.3	26.4	42.7	46.7	43.8	46.3	42.3	43.1	35.5
180	31.4	30.9	28.6	45.9	49.9	46.1	49.2	44.6	46.5	37.9
210	34.4	33.9	30.9	48.7	52.9	49.3	52.0	47.2	49.6	40.9
240	37.2	36.4	33.3	52.0	56.1	52.2	54.8	50.0	52.2	43.3
270	39.2	38.3	34.9	54.3	58.2	54.1	57.1	52.0	54.2	44.6
300	40.9	39.7	36.5	56.3	60.2	55.2	58.7	53.6	55.7	46.4
330	42.6	41.6	38.3	58.6	62.2	57.5	60.6	55.1	57.5	48.3
360	44.0	43.2	39.4	60.5	64.0	59.6	62.3	57.1	59.3	49.7
390	46.4	45.2	41.5	62.8	66.3	61.4	64.3	59.0	61.1	51.3
420	46.9	46.0	42.3	63.9	67.2	62.5	65.3	59.9	62.2	52.1
450	48.5	47.6	43.6	65.6	68.8	63.9	66.6	61.6	63.4	53.4
480	49.1	48.2	44.2	66.1	69.5	64.8	67.4	61.7	64.3	54.1
510	49.5	48.4	44.6	66.5	69.7	64.6	67.5	62.2	64.6	54.5
540	50.1	49.2	45.3	68.0	70.9	65.4	68.7	63.0	65.4	55.7
570	51.7	50.6	46.5	69.4	72.5	67.2	69.8	64.3	66.6	56.9
600	52.7	51.4	47.1	70.3	73.5	69.0	70.7	65.2	67.5	57.6
630	53.8	52.8	48.4	71.5	74.7	69.8	72.0	66.5	68.6	58.4
660	54.9	53.7	49.3	73.0	76.0	70.8	73.1	67.7	69.5	59.4
690	56.1	54.9	50.5	74.3	77.0	71.4	74.1	69.0	70.3	60.1
720	57.0	55.7	51.1	75.1	78.0	72.4	74.9	69.8	71.1	60.7
750	58.6	56.8	52.3	76.4	79.0	73.5	76.0	70.4	72.4	61.9
780	59.1	57.9	53.0	77.1	79.7	74.2	76.6	70.9	73.1	62.4
810	59.5	58.4	53.6	78.0	80.8	75.3	77.5	71.8	73.8	62.9
840	60.4	58.8	54.4	78.6	81.4	75.2	78.0	72.0	74.2	63.6
870	60.7	59.3	54.5	79.1	82.0	75.2	78.5	72.7	75.0	64.2
900	61.5	60.0	55.4	80.0	82.7	76.6	79.2	72.9	75.5	64.6
930	63.2	60.5	55.5	80.8	83.4	77.9	80.0	74.3	75.3	65.2
960	62.7	60.1	55.6	81.3	84.0	78.2	80.3	74.6	76.2	65.9
990	63.2	60.6	55.8	81.5	84.3	78.5	80.9	75.2	76.8	66.5
1020	63.5	61.0	56.1	82.1	84.9	78.9	81.7	75.7	77.5	67.0
1050	64.4	61.6	56.8	82.6	85.5	79.7	82.0	76.4	78.0	67.3
1080	63.9	61.3	56.5	82.5	85.5	79.8	82.0	76.4	78.0	67.6
1110	64.2	61.6	56.8	82.9	86.0	79.8	82.4	76.8	78.4	67.9
1140	65.2	62.3	57.4	83.6	86.6	80.8	83.1	77.9	79.2	68.6
1170	64.0	61.5	56.6	82.9	85.9	79.8	82.7	77.0	79.0	68.4
1200	64.7	61.8	56.9	83.3	86.4	80.4	83.2	77.5	79.1	68.7

パターン 5



付図5　各ポイントにおける時間変化と温度変化の関係

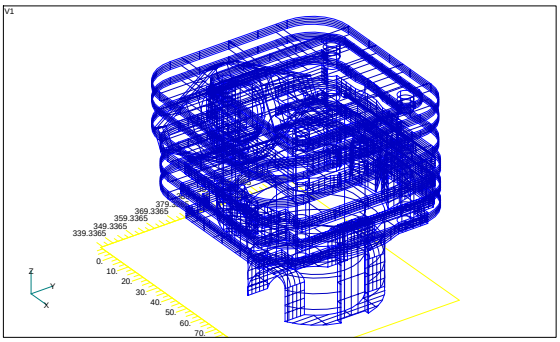
付表 6　時間と温度の関係

	アルミニウム (℃)			FC200鋳鉄 (℃)						
時間 (秒)	point a	point b	point c	poimt d	point e	point f	point g	point h	point i	point j
0	6.0	6.4	7.6	6.4	6.3	6.4	6.4	6.5	6.7	6.7
30	13.1	12.6	12.1	22.9	26.7	22.4	25.9	21.6	19.6	16.2
60	19.5	18.1	16.9	30.4	33.3	31.9	33.3	29.9	27.1	21.6
90	25.2	22.2	20.6	36.4	39.2	37.8	38.7	35.7	32.4	25.9
120	27.2	25.9	23.5	41.4	45.2	41.1	44.6	39.4	38.6	32.3
150	31.2	29.5	27.1	45.8	49.4	44.0	48.2	43.2	42.2	36.0
180	34.5	32.7	29.9	49.8	53.4	47.8	51.9	46.7	45.8	39.0
210	36.7	35.5	32.1	53.2	56.4	49.6	54.4	49.1	49.0	41.9
240	39.1	38.2	34.3	56.3	59.3	52.6	57.3	51.8	51.4	44.5
270	41.9	40.6	36.4	59.3	62.2	55.4	59.9	54.2	54.0	46.7
300	43.6	42.4	38.2	61.3	64.3	57.1	61.7	55.8	56.0	48.3
330	45.8	44.5	39.9	63.9	66.4	59.3	63.6	57.9	57.4	50.0
360	47.4	46.6	41.8	65.8	68.4	61.1	65.6	59.8	59.7	51.7
390	48.6	47.7	42.4	67.0	69.8	61.9	66.7	60.7	60.6	52.6
420	50.4	48.8	44.3	68.7	71.3	63.6	68.1	62.2	62.1	54.2
450	51.4	50.1	45.4	70.2	73.0	64.8	69.5	63.4	63.6	55.4
480	52.2	51.2	46.1	71.6	74.2	66.1	70.4	64.5	64.5	56.5
510	53.8	52.5	47.3	73.3	75.9	68.1	72.1	66.0	65.8	57.5
540	54.6	53.6	48.2	74.2	76.6	69.2	73.1	66.6	67.0	58.5
570	55.8	54.4	49.2	75.3	77.9	70.0	73.8	67.4	67.4	59.2
600	56.6	55.2	49.6	76.1	78.3	70.3	74.5	67.9	68.2	60.0
630	57.6	56.4	50.6	77.1	79.7	71.4	75.7	69.4	69.5	60.9
660	58.3	57.0	51.4	78.2	80.3	72.0	76.6	70.2	70.4	61.6
690	58.8	57.6	51.8	78.8	81.0	72.3	76.9	70.3	70.9	62.0
720	59.8	58.6	52.5	79.7	82.0	73.5	77.9	71.5	71.8	62.9
750	60.6	59.3	53.2	80.6	82.9	74.2	78.8	72.2	72.7	63.8
780	61.4	60.0	54.0	81.6	83.9	75.3	79.7	73.1	73.3	64.4
810	62.0	60.6	54.5	82.5	84.9	76.2	80.6	74.0	74.1	65.1
840	61.9	60.7	55.0	82.6	84.9	75.7	80.6	73.8	74.2	65.3
870	62.7	61.5	55.4	83.2	85.6	76.3	81.2	74.3	74.8	65.9
900	63.3	61.9	55.9	83.8	86.0	77.3	81.8	75.1	75.6	66.6
930	63.7	62.4	56.4	84.4	86.7	77.9	82.3	75.7	75.9	66.9
960	64.1	62.7	56.8	84.7	87.1	78.2	82.7	76.1	76.6	67.5
990	64.3	62.8	56.7	84.7	87.3	78.2	82.9	76.1	76.5	67.6
1020	64.8	63.5	57.2	85.5	87.9	78.9	83.4	76.9	76.9	67.9
1050	65.6	64.2	57.8	86.0	88.2	79.6	83.8	77.1	77.5	68.4
1080	67.1	64.2	57.7	86.2	89.2	80.7	84.4	77.9	77.4	67.9
1110	67.5	64.8	58.6	86.8	89.7	81.2	84.9	78.5	77.9	68.3
1140	67.9	65.3	59.0	87.3	90.2	82.0	85.6	78.9	78.2	68.7
1170	68.3	65.6	59.2	87.9	90.7	82.9	86.2	79.6	78.9	69.2
1200	68.6	65.9	59.6	88.1	91.1	82.8	86.4	79.7	79.2	69.6

付録 2　軸対称モデルと非軸対称モデルの表面積計算

非軸対称モデルの表面積を計算で導き出しそれを軸対称モデルにするために計算した結果を示す。この表面積は実物の寸法をノギスで測る。そこから非軸対称解析モデルを作る。非軸対称モデルではシリンダヘッドの部分が要素を作れなかったので、表面積を同じにして放熱特性が同じになるように解析モデルを作る。その計算結果を示す。

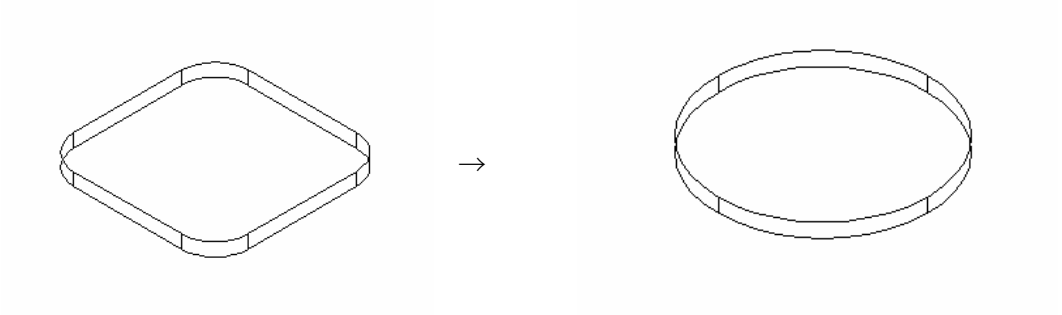
①シリンダブロック



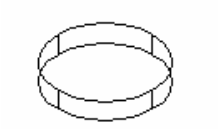
付図 6　シリンダブロックの非軸対称モデル

シリンダブロックの表面積を揃える計算を行う時に爆発力を受ける部分の円柱状の部分を入れずに計算している。なぜならば、中心部分は同じ半径に取り厚さも同じに揃えているので、フィンの面積を出してから真中の穴の部分の面積を引けば、同じ面積になると考えたからである。付図 7〜11 は面積の考え方を示す。また、付表 7 はシリンダブロック部の面積と半径を示す。

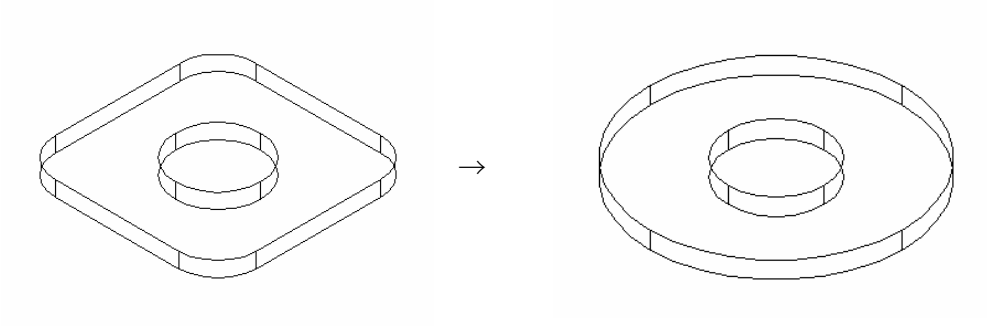
フィンの面積計算の考え方



付図 7 非軸対称モデル　　付図 8　軸対称モデル



付図 9　中心部の穴



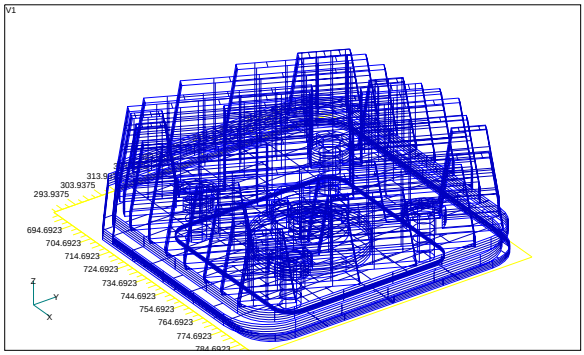
付図 10　非軸対称モデル　　付図 11　軸対称モデル

付表 7　シリンダブロック部の計算

場所	穴をあける前の面積 (m^2)	軸対称モデルの半径 (m)
シリンダヘッドとの接合部	4.00×10^{-3}	3.57×10^{-2}
フィンの1段目	8.02×10^{-3}	5.05×10^{-2}
フィンの付け根 (1段目と2段目の間)	3.08×10^{-3}	3.13×10^{-2}
フィンの2段目	8.02×10^{-3}	5.05×10^{-2}
フィンの付け根 (2段目と3段目の間)	3.08×10^{-3}	3.13×10^{-2}
フィンの3段目	8.02×10^{-3}	5.05×10^{-2}
フィンの付け根 (3段目と4段目の間)	3.08×10^{-3}	3.13×10^{-2}
フィンの4段目	7.74×10^{-3}	4.96×10^{-2}
フィンの付け根 (4段目と5段目の間)	3.33×10^{-3}	3.26×10^{-2}
フィンの5段目	7.74×10^{-3}	4.96×10^{-2}
フィンの付け根 (5段目と6段目の間)	5.25×10^{-3}	4.09×10^{-2}
フィンの6段目	7.74×10^{-3}	4.96×10^{-2}
フィンの付け根 (6段目とエンジン本体との間)	5.05×10^{-3}	4.01×10^{-2}

上記の値を使用してシリンダブロックの軸対称モデルを作成しました。

②シリンダヘッド



付図 12　シリンダヘッドの非軸対称モデル

付表 8　シリンダブロックの表面積計算

場所	面積 (m^2)	軸対称モデルの半径 (m)
シリンダブロックとの接合部	1.01×10^{-2}	5.66×10^{-2}

上面の表面積は、シｒンダヘッドの縦フィンを除いた部分の表面積とシリンダヘッドに付いている縦フィン全体の表面積を計算して合計を出している。

付表 9　シリンダヘッドの表面積

シリンダヘッド全体の表面積	5.73×10^{-2}
シリンダヘッドの底面の表面積 (フィン底面積を含む)	1.01×10^{-2}
シリンダヘッドの底面の表面積 (フィン底面積を除く)	6.58×10^{-3}
非軸対称モデルのフィンの天井部の表面積	6.76×10^{-3}
軸対称モデルの天井部の表面積	4.49×10^{-3}

非軸対称モデルのフィンの天井部－軸対称モデルのフィンの天井部＝$2.27\times10^{-3}m^2$

軸対称モデルの天井部分の表面積の方が $2.27\times10^{-3}m^2$少なくなるので縦フィンの高さを実際の高さより高くして放熱特性が同じになるように計算している。

ここでフィンの厚みは全ての平均として 3.25×10^{-3}mを使っている。また、フィンの取り付け位置も平均値を出して 5.29×10^{-3}mを使っている。ここで縦フィンの枚数を７枚として計算する。

縦フィンの表面積＝$2\pi h$

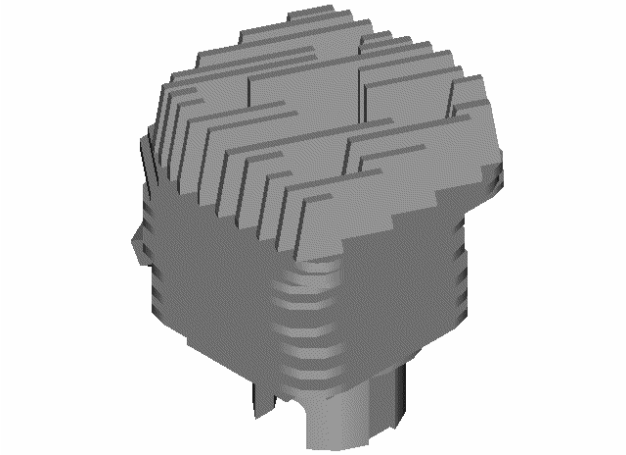
h：縦フィンの高さ

ヘッドの全表面積－非軸対称モデルの天井部の表面積＋足りない部分

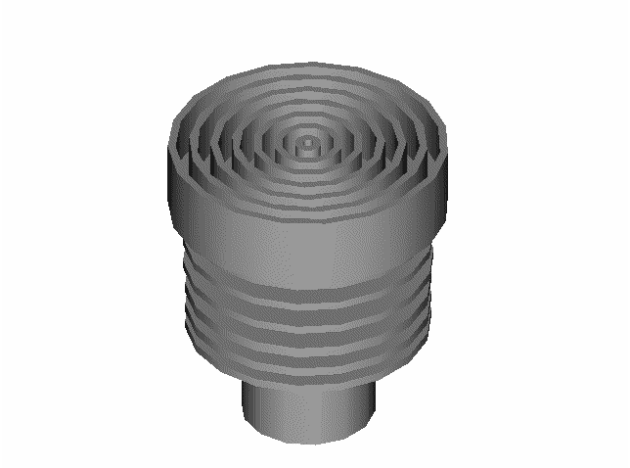
$2\pi h=5.73\times10^{-1}m^2-1.01\times10^{-2}m^2+2.27\times10^{-3}m^2$

$h=1.91\times10^{-2}m$

こうして導き出した長さを用いて軸対称モデルを作る。



付図 13　非軸対称モデル



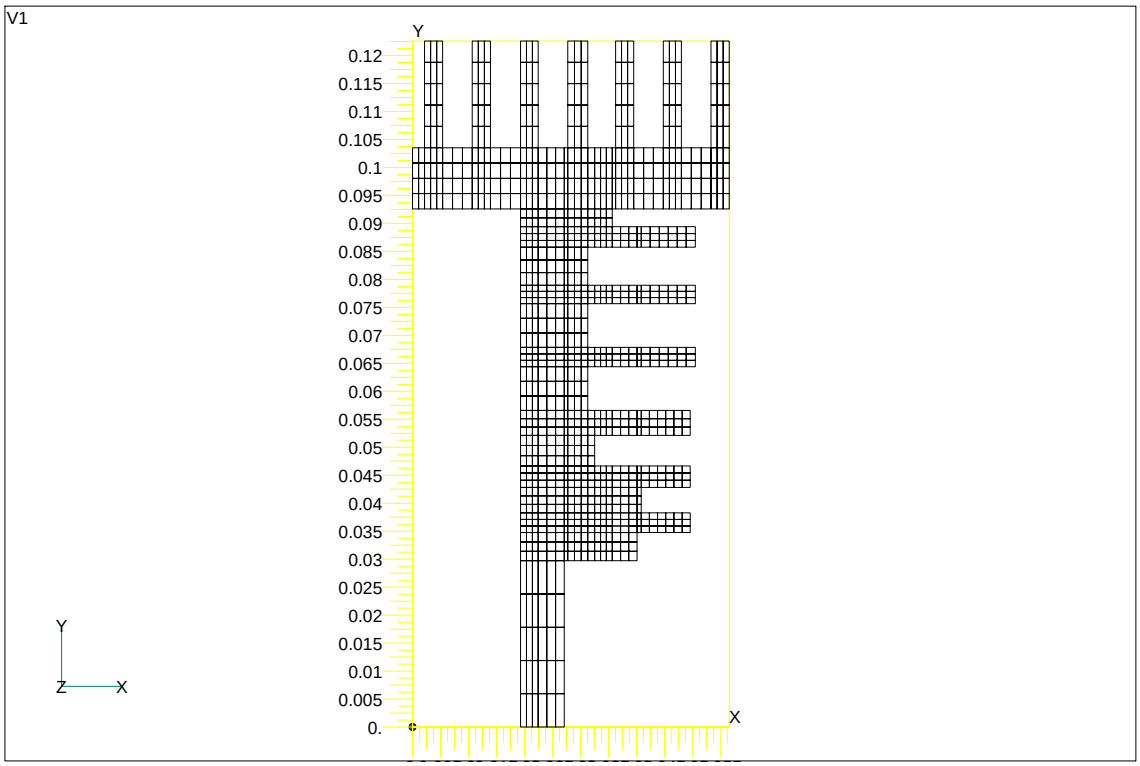
付図 14　軸対称モデル

付録 3　今回使用した解析の inp ファイル
軸対称モデルを作るための inp ファイル（group2ac.inp）

本研究で作った解析モデルの ABAQUS への inp ファイルを示す。

解析モデル

解析モデルを図 1 に示す。解析モデルはシリンダブロックは内径 0.0193m、外径 0.0271 mの円筒で、高さ 0.0926m、フィンの厚さは実機と同じ厚さに揃え、フィンの位置も実機に揃え製作しました。また、シリンダヘッドは高さ 0.0109m、半径 0.0566mの円柱状と考え、厚さ 0.00324m、高さ 0.019m のフィンが 0.00529m間隔で縦方向に付いている。モデルです。また、シリンダブロックのフィンの半径及びシリンダヘッドの半径は実機の表面積と軸対称モデルの表面積が同じであれば放熱量が同じと考え、計算をして半径を出しています。



付図 15　解析モデル図（エンジンのシリンダブロック及びシリンダヘッドの軸対称モデル）

```
** ************************************************************************
**   Written by : MSC/NASTRAN for Windows
**   Version    : 5.00
**   From Model : ¥¥Z081¥z081hdd¥卒業研究中野¥nakano¥honnban¥kansei¥group1.MOD
**   Date       : Sat Jan 24 15:12:12 2004
** ************************************************************************
**
節点の定義：
*NODE, NSET=GLOBAL
        1,  0.00213224,      0.10352,           0.
        2, 0.003214145,      0.10352,           0.
        : （中略）
     1914,  0.04817133,      0.03829,           0.
     1915,     0.049632,      0.03829,           0.
要素の定義（アルミニウムの要素を定義）
DCAX4  拡散を考慮した軸対称4節点要素を使用
*ELEMENT, TYPE=DCAX4, ELSET=P2
       1,       1,       2,       6,       5
       2,       2,       3,       7,       6
       : （中略）
     280,     468,     469,     472,     471
     281,     469,     470,       1,     472
要素の定義（FC200の要素を定義）
DCAX4  拡散を考慮した軸対称4節点要素を使用
*ELEMENT, TYPE=DCAX4, ELSET=P1
     282,     474,     651,     479,     478
     283,     651,     476,     480,     479
       : （中略）
    1052,    1584,    1907,    1914,    1588
    1053,    1907,    1908,    1915,    1914
アルミニウムで第2面を表面とする要素群をal3と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 1 : al3
*ELSET, ELSET=al3
13,14,15,28,29,30,43,44,45,58
59,60,73,74,75,88,89,90,103,104
105,127,128,129,151,152,153,169,179,180
```

181,185,201,211,212,213,235,236,237,259
260,261,280,281
アルミニウムで第2面を表面とする要素群をal2と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 2 : al2
*ELSET, ELSET=al2
3,6,9,12,18,21,24,27,33,36
39,42,48,51,54,57,63,66,69,72
78,81,84,87,93,96,99,102,108,111
114,117
アルミニウムで第4面を表面とする要素群をal4と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 3 : al4
*ELSET, ELSET=al4
1,4,7,10,16,19,22,25,31,34
37,40,46,49,52,55,61,64,67,70
76,79,82,85,91,94,97,100
FC200で第2面を表面とする要素群をfc2と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 4 : fc2
*ELSET, ELSET=fc2
306,309,396,399,402,468,471,474,561,564
567,652,653,654,748,749,750,867,870,873
951,957,963,969,975,981,987,993,999,1005
1011,1017,1023,1029,1035,1041,1047,1053
FC200で第3面を表面とする要素群をfc3と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 5 : fc3
*ELSET, ELSET=fc3
321,328,329,330,435,442,443,444,451,452
453,456,528,535,536,537,544,545,546,549
621,628,629,630,637,638,639,642,724,725
726,733,734,735,738,958,959,960,961,962
976,977,978,979,980,994,995,996,997,998
1012,1013,1014,1015,1016,1030,1031,1032,1033,1034
1048,1049,1050,1051,1052
FC200で第1面を表面とする要素群をfc1と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 6 : fc1
*ELSET, ELSET=fc1
319,322,323,324,331,332,333,340,433,436

437,438,445,446,447,454,526,529,530,531
538,539,540,547,622,623,624,631,632,633
640,853,946,947,948,949,950,964,965,966
967,968,982,983,984,985,986,1000,1001,1002
1003,1004,1018,1019,1020,1021,1022,1036,1037,1038
1039,1040
アルミニウムで第1面を表面とする要素群をal1と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 7 : al1
*ELSET, ELSET=al1
106,107,118,119,120,130,131,132,142,143
144,154,155,156,166
温度を与える節点群をtemp1と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 8 : temp1
*NSET, NSET=temp1
380,381,400,401,402,419,420,421,422,439
440,441,459,460
温度を与える節点群をtemp2と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 9 : temp2
*NSET, NSET=temp2
474,478,642,646,662,666
温度を与える節点群をtemp3と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 10 : temp3
*NSET, NSET=temp3
658,710,714,718,722,878
温度を与える節点群をtemp4と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 11 : temp4
*NSET, NSET=temp4
870,874,886,890,894,1054
温度を与える節点群をtemp5と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 12 : temp5
*NSET, NSET=temp5
1046,1050,1066,1070,1238,1242
温度を与える節点群をtemp6と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 13 : temp6
*NSET, NSET=temp6
1234,1246,1250,1254,1258,1462

温度を与える節点群をtemp7と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 14 : temp7
*NSET, NSET=temp7
1454,1458,1474,1478,1678,1682
温度を与える節点群をtemp8と名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 15 : temp8
*NSET, NSET=temp8
1670,1674,1686,1690,1694,1698,1702
全ての節点をnallと名づける
** MSC/NASTRAN for Windows Group 16 : nall
*NSET, NSET=nall
1,2,3,5,6,7,8,9,10,11
: （中略）
1908,1909,1910,1911,1912,1914,1915
*ELSET, ELSET=OUT_CONT, GENERATE
1,309,1
319,456,1
466,549,1
559,642,1
652,738,1
748,855,1
865,1053,1
表面データの定義（要素群al1の第1面を特性PCYLを持つ表面alと定義する）
表面データの定義（要素群al2の第2面を特性PCYLを持つ表面alと定義する）
表面データの定義（要素群al3の第3面を特性PCYLを持つ表面alと定義する）
表面データの定義（要素群al4の第4面を特性PCYLを持つ表面alと定義する）
*SURFACE DEFINITION,NAME=al,PROPERTY=PCYL
al1,s1
al2,s2
al3,s3
al4,s4
表面データの定義（要素群fc1の第1面を特性PBDYを持つ表面fcと定義する）
表面データの定義（要素群fc2の第1面を特性PBDYを持つ表面fcと定義する）
表面データの定義（要素群fc3の第1面を特性PBDYを持つ表面fcと定義する）
*SURFACE DEFINITION,NAME=fc,PROPERTY=PBDY
fc1,s1

```
fc2,s2
fc3,s3
表面特性PCYLの定義
*SURFACE PROPERTY,NAME=PCYL
表面特性PCYLのふく射率の定義
*EMISSIVITY
0.04D0
表面特性PBDYの定義
*SURFACE PROPERTY,NAME=PBDY
表面特性PBDYのふく射率の定義
*EMISSIVITY
0.7D0
要素群P1の材料特性をM1で定義する
** MSC/NASTRAN for Windows Property 1 : fc200
*SOLID SECTION, ELSET=P1, MATERIAL=M1
要素群P2の材料特性をM2で定義する
** MSC/NASTRAN for Windows Property 2 : aluminium
*SOLID SECTION, ELSET=P2, MATERIAL=M2
材料特性M1のデータ定義
** MSC/NASTRAN for Windows Material 1 : fc200
*MATERIAL, NAME=M1
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
 1.009E+11,        0.3,         0.
*EXPANSION, TYPE=ISO
  0.000012,         0.
*DENSITY
      7200.
*SPECIFIC HEAT
       483.,         0.
*CONDUCTIVITY, TYPE=ISO
        50.,         0.
材料特性M2のデータ定義
** MSC/NASTRAN for Windows Material 2 : ALUMINIUM
*MATERIAL, NAME=M2
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
6.8258E+10,       0.33,         0.
```

```
*EXPANSION, TYPE=ISO
 0.0000237,          0.
*DENSITY
      2688.
*SPECIFIC HEAT
       905.,          0.
*CONDUCTIVITY, TYPE=ISO
       237.,          0.
```
再解析用のファイルをステップ100ごとに書き出す
```
*RESTART,WRITE,FREQUENCY=100
```
物理定数の定義　Stefan Boltzmann 定数5.6697x10^{-8}W/(m^{2}° K^{4})、絶対温度　-273℃）
```
*PHYSICAL CONSTANTS,STEFANBOLTZMANN=5.6697D-8,ABSOLUTE ZERO=-273.
```
初期条件として温度を定義　節点群NALLが5℃
```
*INITIAL CONDITION,TYPE=TEMPERATURE
NALL,5.
** Load Step 1 ----------------------------------------------------
```
荷重1ステップの定義
```
*STEP
temp
```
熱伝達解析を定常解析として行う
```
*HEAT TRANSFER, STEADY STATE
         0.,          0.,          0.,          0.
*NODE PRINT
   NT
 RFLE
*EL PRINT, ELSET=OUT_CONT, POSITION=CENTROIDAL
 TEMP
  HFL
*EL PRINT, ELSET=OUT_CONT,POSITION=NODES
 TEMP
  HFL
```
出力ファイルへの出力様式をASCIIとする
```
*FILE FORMAT, ASCII
```
節点群NALLの計算結果NT（温度）をFILファイルに出力
```
*NODE FILE
   NT
```

 RFLE
*EL FILE, ELSET=OUT_CONT, POSITION=CENTROIDAL
 TEMP
  HFL
*EL FILE, ELSET=OUT_CONT,POSITION=NODES
 TEMP
  HFL
熱境界条件　節点群temp1～temp8で6℃を与える
*BOUNDARY
temp1,11,,6
temp2,11,,6
temp3,11,,6
temp4,11,,6
temp5,11,,6
temp6,11,,6
temp7,11,,6
temp8,11,,6
表面膜の定義
要素群al1の第1面で、周囲の温度6℃、熱伝達係数は20W/(m²℃)
要素群al2の第2面で、周囲の温度6℃、熱伝達係数は20W/(m²℃)
要素群al3の第3面で、周囲の温度6℃、熱伝達係数は20W/(m²℃)
要素群al4の第4面で、周囲の温度6℃、熱伝達係数は20W/(m²℃)
要素群fc1の第1面で、周囲の温度6℃、熱伝達係数は10W/(m²℃)
要素群fc2の第2面で、周囲の温度6℃、熱伝達係数は10W/(m²℃)
要素群fc3の第3面で、周囲の温度6℃、熱伝達係数は10W/(m²℃)
*FILM
al1,F1,6.,20.
al2,F2,6.,20.
al3,F3,6.,20.
al4,F4,6.,20.
fc1,F1,6.,10.
fc2,F2,6.,10.
fc3,F3,6.,10.
荷重ステップのデータの終了
*END STEP
荷重２ステップの定義

*step
熱伝達解析（過渡解析）を10秒毎に0秒から50秒まで行う
*HEAT TRANSFER
10,50
熱境界条件　節点群temp1～temp8で下記の10～50℃を与える
*BOUNDARY, OP=NEW
temp1,11,,50
temp2,11,,40
temp3,11,,30
temp4,11,,20
temp5,11,,10
temp6,11,,10
temp7,11,,10
temp8,11,,10
*NODE FILE
　NT
荷重ステップのデータの終了
*END STEP
荷重3ステップの定義
*step
熱伝達解析（過渡解析）を10秒毎に50秒から100秒まで行う
*HEAT TRANSFER
10,100
熱境界条件　節点群temp1～temp8で下記の15～100℃を与える
*BOUNDARY, OP=NEW
temp1,11,,100
temp2,11,,80
temp3,11,,60
temp4,11,,40
temp5,11,,35
temp6,11,,30
temp7,11,,20
temp8,11,,15
*NODE FILE
　NT
荷重ステップのデータの終了

```
*END STEP
荷重4ステップの定義
*step
熱伝達解析（過渡解析）を10秒毎に100秒から150秒まで行う
*HEAT TRANSFER
10,150
熱境界条件　節点群temp1～temp8で下記の35～150℃を与える
*BOUNDARY, OP=NEW
temp1,11,,150
temp2,11,,100
temp3,11,,80
temp4,11,,60
temp5,11,,50
temp6,11,,45
temp7,11,,40
temp8,11,,35
*NODE FILE
   NT
荷重ステップのデータの終了
*END STEP
荷重5ステップの定義
*step
熱伝達解析（過渡解析）を10秒毎に150秒から200秒まで行う
*HEAT TRANSFER
10,200
熱境界条件　節点群temp1～temp8で下記の45～200℃を与える
*BOUNDARY, OP=NEW
temp1,11,,200
temp2,11,,120
temp3,11,,100
temp4,11,,80
temp5,11,,60
temp6,11,,55
temp7,11,,50
temp8,11,,45
*NODE FILE
```

NT

荷重ステップのデータの終了

*END STEP

付録 4　伝熱解析に関する基礎式

今回の伝熱解析に必要な基礎的な語句及び基礎式を以下にまとめる。

1 章　定常熱伝導

1-1　定常熱伝導について

一般に物体が加熱または冷却されるとき、物体内部の温度分布は時間的に変化する。したがって、熱移動量も時間的に変化する。しかし、長時間同じ状態で運転されているボイラーの管壁では温度分布はほとんど変化せず、熱移動の状態はほぼ一定である。このような場合には時間的な変動を無視して、定常的な熱伝導状態にあるとみる。厳密な意味では時間的に変化しない現象はないので、定常熱伝導は近似的な手法ともいえるが、数学的な取り扱いが簡単で、熱伝導の原理を理解するには都合がよい。ここでは時間に対して温度分布が変化しない定常熱伝導の基礎式とその利用について説明する。

1-2 熱伝導の基礎式

多くの場合、固体内部または接触した固体間で起こる熱移動を熱伝導と呼ぶ。熱伝導の状態を理解するために、物体内の微小な体積要素について、熱エネルギバランスを考える。体積要素の熱エネルギとして考える必要のある項目は x、y、z の 3 方向の熱の移動と、体積要素内部の熱発生である。また体積要素のもつ熱エネルギの変化もない。

x方向の熱移動としては、入口側の面から熱流束q_xが入り、この体積要素のx方向の距離dx間で熱流束が$\partial q_x / \partial x$の変化率で変化したとすると、出口側の面の熱流束は、

$$q + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad （1・1）$$

となる。微小時間dtの熱移動量は熱流束に面積と時間をかければよいから、x方向の流入熱量Q_{xin}は、

$$Q_{xin} = q_x dy \cdot dz \cdot dt \quad （1・2）$$

であり、放出熱量Q_{xout}は、

$$Q_{xout} = \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy \cdot dz \cdot dt \quad （1・3）$$

となる。したがって、x方向の熱移動による体積要素の熱量の増加Q_{xres}はこの両式の差から、

$$Q_{xres} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad （1・4）$$

と表される。ここで、dx・dy・dz＝dV（体積要素の体積）である。y、z方向についても同様な式が得られる。y、z方向の熱流束をq_y、q_zとすると、x、y、zの各方向についても微小時間の熱量の増加の合計は次式のようになる。

$$Q_1 = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dVdt \quad （1・5）$$

一方、単位体積当たり、単位時間当たりの熱発生を q‴とすれば、時間 dt の間の体積要素内の発生熱量は、

$Q_2 = q'''dVdt$ （1・6）

である。これらの熱量がバランスを保つためには式（1・5）と式（1・6）和が 0 になる必要があるから、

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dV \cdot dt + q'''dVdt = 0 \quad （1・7）$$

となり、整理すると次式が得られる。

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + q''' = 0 \quad （1・8）$$

また、各方向の熱流束はフーリエの式より、

$$q_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad （1・9）$$

である。式（1・9）を式（1・8）に代入すると、

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} + q''' = 0 \quad （1・10）$$

となり、式（1・10）が熱発生のある場合の三次元熱伝導方程式である。

1-3　熱伝導率が一定の場合の熱伝導

均質な当方性（各方向の物性値が一定）の物質で、熱伝導率が温度によっても変動しないとすれば、式（1・10）は次のようになる。すなわち、λx＝λy＝λz＝λ＝一定より、

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{q'''}{\lambda} \quad （1・11）$$

となる。特に、熱発生がない場合は q‴＝0 であるから次式のようになる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad （1・12）$$

2 章　非定常熱伝導

2-1　非定常熱伝導について

金属を焼き入れする場合には、金属の表面温度や内部の温度分布が時間的に急激に変化する。間欠的な燃焼を行う内燃機関の壁においても、燃料の燃焼熱によって壁面が間欠的に加熱されるために、壁の表面温度や壁内部の温度分布が時々刻々変化する。また、地球表面においても 1 日または 1 年という単位で加熱、冷却が繰り返されるため、時間的に温度が変化する。この例のように、物体を加熱または冷却するときには、物体の温度分布や物体内部の熱流束が時間的に変化する。このような状態を非定常伝熱状態といい、熱伝導である場合は非定常熱伝導という。

先に述べた金属の焼き入れの例では、金属の温度の時間的な変化が組織に大きく影響し、さらに温度変化がどの深さまで浸透するかが焼き入れの成否を左右する。このように、加熱または冷却時の物体内の時間的な温度変化や温度変化の浸透深さを求めることは工学上重要な課題である。また、これは急激に温度変化があるための物体の熱膨張や収縮、それによる部材への応力問題を解決する手段となる。

2-2　非定常熱伝導の方程式

定常熱伝導では熱エネルギのバランスを考えて、微小な体積要素内の熱移動による熱量の差が熱発生による熱量とバランスを保つとした。非定常熱伝導の場合これに加えて体積要素の時間的温度変化（熱エネルギ変化）を考慮する必要がある。

X、y、z の 3 方向の長さがそれぞれ dx、dy、dz である微小体積要素（体積 dV）の温度 T、比熱を c、密度をρとすると、単位体積当たりの熱容量はρc であるから、微小時間 dt における体積要素の熱量の変化は、

$$\rho c dV \frac{\partial T}{\partial t} dt \quad （2・1）$$

となる。また、熱移動による体積要素内の熱量の増加量（流入量と流出量の差）はx方向については流入する熱流束をq_xとするとdt時間について、

$$\left\{ q_x - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) \right\} dydzdt = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dxdydzdt \quad （2・2）$$

である。y 方向、z 方向についても同様な式が得られる。体積要素の内部発熱を q‴dVdt（q‴は熱発生率）とすると、体積要素の持つ熱量の増加分は、熱移動による熱量の増加分と発生熱による熱量分の和であるから、

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + q''' \quad （2・3）$$

となる。さらにq_x、q_y、q_zにフーリエの式を代入すると、

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right\}+q'''\quad（2・4）$$

となる。これが 3 次元の非定常熱伝導方程式である。

ここで、均質、等方性物質を考えて、熱伝導率が方向や温度によらず一定であるとすれば、$\lambda_x=\lambda_y=\lambda_z=\lambda$と置いて、

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\lambda}{\rho c}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\frac{1}{\rho c}q'''\quad（2・5）$$

が得られる。これを三次元の非定常熱伝導方程式という場合もある。

ここで右辺の$\lambda/\rho c$を、

$$a=\frac{\lambda}{\rho c}\quad（2・6）$$

と置き、a を温度伝導率または熱拡散率（thermal　diffusivity）と呼ぶ。

3 章　自然対流熱伝達

3-1　自然対流熱伝達について

強制対流熱伝達はポンプなどの系外の駆動力によって強制的に流体を流動させた場に生じる熱移動であるのに対して、自然対流熱伝達（natural　convection　heat　transfer）では熱移動によって流体に密度変化が生じ、密度差によって生じた流れによる熱移動である。

具体的な例としては、例えば送風機を持たない暖房機による空気の加熱や、冷暖房器の配管途中で、管から周囲の空気へ熱が逃げたり、または逆に熱を吸収したりする熱移動が自然対流熱伝達である。強制対流熱伝達に比べてその伝熱量は少ないため、工学的には積極的にこれを利用する例は少ない。しかし、熱交換を行う空間が限定されて、ポンプなどの流体の駆動装置ができなかったり、省スペースやコスト低減のためにポンプなどの駆動装置を省略する場合に、この自然対流熱伝達を利用する。

ここでは自然対流熱伝達の基本的な考え方と具体的な熱伝達率について説明する。

3-2　自然対流熱伝達の基礎式

簡単のために 2 次元の微小体積要素（x、y方向の長さ：dx、dy）について、強制対流の場合と同様に質量保存、運動量、エネルギ保存を考えると次式のようになる。ここでu、v はそれぞれx、y方向の速度、ρ は密度、pは圧力、θ は温度、λ は熱伝導率、η は粘性係数、c_pは低圧比熱、Xはx方向の体積力である。

（1）連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \quad (3\cdot 1)$$

（2）運動方程式

式（4・2）において左辺については定常条件と密度変化を考慮し、右辺では粘性項と体積力のみを考えると次式のようになる。

$$u\frac{\partial \rho u}{\partial x}+v\frac{\partial \rho u}{\partial y}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\eta\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\rho X \quad (3\cdot 2)$$

（3）エネルギ方程式

$$u\frac{\partial \theta}{\partial x}+v\frac{\partial \theta}{\partial y}=\frac{\lambda}{\rho c_p}\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (3\cdot 3)$$

垂直平板の自然対流熱伝達

平板に沿ってx軸を考えると、圧力pは静止流体の圧力に等しく、静止流体の密度を ρ_0、重力加速度をgと置き、温度変化がある流体の密度を ρ とすると、圧力変化 dp/dx は、

$$\frac{dp}{dx}=-\rho_0 g \quad (3\cdot 4)$$

となる。したがって式（3・2）の右辺の一部は、

$$\frac{dp}{dx}+\rho g=g(\rho-\rho_0)=\rho_0 g\left(\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\right) \quad (3\cdot 5)$$

静止流体の温度 θ0 と任意点の温度 θ との温度差を⊿θ とし、流体の体積膨張率（体膨張係数）を β とすると、密度 ρ は、

$\rho=\rho_0/(1+\Delta\theta\cdot\beta)$（3・6）

となる。一般には⊿θ・β＜＜1 であるので式（5・5）は、

$$\frac{dp}{dx}+\rho g=-\rho_0 g\Delta\theta\beta \quad (3\cdot 7)$$

となる。したがってこれを式（3・2）に代入すると次式のようになる。

$$u\frac{\partial \rho u}{\partial x}+v\frac{\partial \rho u}{\partial y}=\eta\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\rho_0 g\Delta\theta\beta \quad (3\cdot 8)$$

さらに温度差が少ない範囲では u の変化に比べて ρ の変化は少ないから、ρ を一定として ρ ＝ ρ0、動粘性係数を ν と置いて、

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+g\Delta\theta\beta \quad (3\cdot 9)$$

これが自然対流の場合の運動方程式である。